

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Obor 2303V002 Strojírenská technologie

zaměření

Tváření kovů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Stabilita procesu tváření v závislosti na technologii přípravy polotovaru

Analysis of the Effect of Blank Preparation on Forming Process Stability

Ing. Martin Luňáček

Vedoucí katedry: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Školitel: doc. Ing. Mirko Král, CSc.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 147

Počet obrázků: 133

Počet tabulek: 28

Počet příloh: 5

Anotace

Téma práce: *Stabilita procesu tváření v závislosti na technologii přípravy polotovaru*

Disertační práce se zabývá hodnocením následných plastických vlastností vysokopevnostních ocelových plechů (přístřihů) skupiny materiálů **UHSS** (Ultra High Strength Steels) z hlediska jejich přípravy pro prototypovou, ale především hromadnou výrobu. Cílem práce je u vybraných materiálů (martenzitické oceli **DOCOL 1200 M** a **BTR 165**) popsat jejich chování (zejména následné plastické vlastnosti) pokud tyto polotovary budou připravovány různými technologiemi (způsoby dělení).

Stěženi částí práce je provést komplexní hodnocení plastických vlastností a rozbor nejběžnějších technologií přípravy plechových přístřihů z kategorie UHSS, a to technologie stříhání a dělení pomocí laseru a plazmy. Jako etalon při vyhodnocení experimentu bude sloužit série vzorků připravených technologií broušení. Každá z nekonvenčních technologií je specifická a je definována svými parametry. Znalost vlivu jednotlivých technologií dělení a parametrů pomůže zefektivnit navrhování vysoce exponovaných dílů karoserie, jakými jsou zejména výztuhy, které jsou stěžejním prvkem celé koncepce samonosné karoserie. Tyto výztuhy v podstatě definují její tuhost a výraznou měrou se tak podílí na pasivní bezpečnosti posádky vozu.

Klíčová slova: vysokopevnostní materiály, nekonvenční technologie dělení, plastické vlastnosti

Annotation

Subject of thesis: *Analysis of the Effect of Blank Preparation on Forming Process Stability*

The Doctoral Thesis deals with the influence of different methods of blank preparation on the plastic properties of **UHSS** materials (Ultra High Strength Steels) from the preparation for prototyping, but namely serial production point of view. The aim of the Thesis is to describe the behaviour of selected Ultra High Strength Steels (martensite steels **DOCOL 1200 M** and **BTR 165**) during forming, after the blanks were prepared by different separating methods.

The general part of work is to make complex classification plastics characteristics and analysis most common technology of steels sheets preparation, namely Cutting and parting by Laser and Plasma. As etalon for evaluation experiment will be instrumental series preparation by Grinded technology. Each of the unconventional production methods is defined by its parameters and the knowledge of the effects of the single parameters will help to improve the effective design of the highly stressed parts of the car body such as the reinforcing parts. The reinforcing parts are the main elements of the chassis-less car body concept as they markedly define its stiffness and so distinctly influence the safety of passengers.

Keywords: High-Strength Materials, Unconventional Methods of Parting Materials, Plastic Characteristics

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval mému školiteli doc. Ing. Mirko Královi, CSc., za všestrannou pomoc v průběhu mého studia a cenné rady a připomínky, které mi pomohly k úspěšnému vypracování této disertační práce.

Dále bych chtěl poděkovat kolegům, jmenovitě Ing. Jiřímu Sobotkovi Ph.D, Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D., Ing. Pavlu Doubkovi, Ph.D. a Ing. Michaele Kolnerové, Ph.D. za pomoc při řešení konkrétních problémů, které se vyskytly v průběhu celé práce a dále všem členům Katedry strojírenské technologie za poskytnutí výborného pracovního zázemí. Můj díky patří také Ing. Viktoru Mikešovi a Ing. Janu Slámovi, protože z jejich strany vzešlo téma této práce. Největší dík patří Ing. Miroslavu Bašemu a Ing. Ladislavu Matějkovi z firmy Benteler za pomoc při přípravě vzorků. Bez jejich pomoci a hlavně ochotě řešit ihned konkrétní problémy bych tuto práci úspěšně nedokončil.

V neposlední řadě patří poděkování mým rodičům za všestrannou pomoc a firmě T.F.A. Alfa s.r.o., zejména Ing. Ladislavu Filipu za výrobní podporu.



Obsah:

1.	ÚVOD.....	9
2.	KONCEPCE AUTOMOBILOVÉ KAROSÉRIE	10
2.1.	Konvenční způsoby stavby karoserie automobilů.....	10
2.2.	Nové směry v konstrukci karoserie	12
2.2.1.	Svařované přístřihy.....	14
2.2.2.	Vývalky proměnné tloušťky	15
2.2.3.	Sendvičové materiály	16
2.3.	Vize vývoje karoserií.....	17
3.	OCELOVÉ MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO STAVBU KAROSERIE	17
3.1.	Rozdělení vysokopevnostních plechů pro stavbu karoserie	18
3.1.1.	DP oceli.....	18
3.1.2.	TRIP oceli	19
3.1.3.	TWIP oceli	20
3.1.4.	CP oceli (vícefázové oceli)	22
3.1.5.	MS oceli.....	23
3.1.6.	Mangan – bórové oceli	23
3.2.	Klasifikace materiálů používaných pro stavbu karoserie	24
3.3.	Možnosti zvýšení mechanických hodnot UHSS ocelí.....	24
3.3.1.	Deformační zpevnění.....	24
3.3.2.	Zpevnění tuhého roztoku	25
3.3.3.	Zpevnění zjemněním zrna.....	25
3.3.4.	Zvýšení pevnosti u dvou a vícefázové struktury.....	25
3.3.5.	Zvýšení pevnosti pomocí tepelně – mechanického zpracování	25
4.	MOŽNOSTI PŘÍPRAVY PLECHOVÝCH PŘÍSTŘIHŮ	26
4.1.	Mechanické dělení – stříhání	26
4.1.1.	Charakteristika konvenčního stříhání	27
4.1.2.	Charakteristika přesného stříhání	28
4.2.	Nekonvenční způsoby dělení plechu	29
4.2.1.	Vodní paprsek	30
4.2.2.	Laser	32
4.2.3.	Plazma.....	36
4.3.	Obecné porovnání nekonvenčních metod.....	39

5.	ZÁKLADY LOMOVÉ MECHANIKY KOVŮ	41
6.	TEPLOTNÍ DĚJE PŘI TERMICKÉM DĚLENÍ.....	57
6.1.	Definice a popis tvaru tepelného zdroje	58
6.1.1.	Teplovní pole od dvouelipsoidního zdroje tepla.....	59
6.1.2.	3D Gaussian	60
7.	CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH ZKOUŠEK	62
7.1.	Statická zkouška tahem.....	62
7.2.	Zkouška rozšiřováním otvoru	66
7.3.	Zkouška tříbodovým ohybem	67
7.4.	Zkouška vrubové houževnatosti.....	70
8.	CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....	72
8.1.	Volba a definice mezního stavu	72
8.2.	Schéma experimentu.....	74
9.	STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA TESTOVANÝCH MATERIÁLŮ	75
9.1.	DOCOL.....	75
9.1.1.	DOCOL 1200 M.....	76
9.2.	BTR 165.....	78
9.2.1.	Termomechanické zpracování (kalení lisováním)	81
10.	PŘÍPRAVA VZORKŮ	84
10.1.	Příprava vzorků z materiálu DOCOL 1200 M.....	84
10.1.1.	Příprava stříhaných vzorků	84
10.1.2.	Příprava broušených vzorků.....	85
10.1.3.	Příprava vzorků řezaných laserem	86
10.1.4.	Příprava vzorků řezaných plazmou	86
10.2.	Příprava vzorků z materiálu BTR 165.....	87
10.2.1.	Příprava stříhaných vzorků před tepelným zpracováním	88
10.2.2.	Příprava stříhaných vzorků po tepelném zpracování.....	89
11.	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	90
11.1.	DOCOL 1200 M.....	90
11.1.1.	Výsledky statické zkoušky tahem	90
11.1.2.	Výsledky zkoušky rozšiřováním otvoru	94
11.1.3.	Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem	102
11.1.4.	Výsledky zkoušky rázem v ohybu.....	109



11.1.5. Struktury a gradienty tvrdosti v ovlivněné oblasti - DOCOL 1200 M.....	111
11.1.6. Dílčí závěry - DOCOL 1200 M.....	115
11.2. BTR 165.....	119
11.2.1. Výsledky statické zkoušky tahem	119
11.2.2. Výsledky zkoušky rozšiřováním otvoru	123
11.2.3. Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem	127
11.2.4. Výsledky zkoušky rázem v ohybu.....	128
11.2.5. Gradienty tvrdosti a struktury v ovlivněné oblasti – BTR 165	129
11.2.6. Dílčí závěry - BTR 165.....	134
12. DISKUSE VÝSLEDKŮ	137
13. DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM.....	140
14. ZÁVĚR	141
15. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	144
16. SEZNAM PUBLIKACÍ K DANÉ PROBLEMATICE.....	146
17. SEZNAM PŘÍLOH	147

Disertační práce vznikla za podpory výkumného záměru **MŠM 4674788501** a **GAČR 101/07/P113**.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Význam
A_x	%	Tažnost
AWJ		Abrasive Water Jet
bcc		Base Centre Cubic
BH		Bake Hardening
c	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Měrná tepelná kapacita
CP		Complex Phase
d'	-	Poměrné rozšíření otvoru
d_0	mm	Počáteční průměr rozšiřovaného otvoru
d_1	mm	Konečný průměr rozšiřovaného otvoru
d_{max}	mm	Maximální průměr rozšiřovaného otvoru
d_{min}	mm	Minimální průměr rozšiřovaného otvoru
DP		Dual Phase
E	MPa	Youngův modul pružnosti v tahu
fcc		Face Centre Cubic
F_e	N	Síla odpovídající výrazné mezi kluzu
F_p	N	Síla přidržovače
F_v	N	Síla vyhazovače
G	MPa	Modul pružnosti ve smyku
h	mm	Výška jamky lomové plochy
HD		High Definition
h_s	mm	Hloubka vniknutí břitů při stříhání
HSS		High-Strength Steels
k	-	Koeficient zaplnění plochy
KC	J/cm^2	Rázová práce
KTL		Katodoretické lakování
KUT	-	Komplexní ukazatel tvažitelnosti
L_0	mm	Počáteční měřená délka
LSS		Low-Strength Steels
L_u	mm	Konečná měřená délka po lomu
MAG		Metal Active Gas
M_{fk}	$^{\circ}C$	Teplota konce martenzitické přeměny při v_k
MIG		Metal Inert Gas
M_{sk}	$^{\circ}C$	Teplota začátku martenzitické přeměny při v_k
MS		Martenzite Steels
NTZM		Nízkoteplotní tepelně mechanické zpracování
PAC		Plasma Arc Cutting
PE		Polyethylen



PKL		Podíl křehkého lomu
PP		Polypropylen
R_e	MPa	Výrazná mez kluzu
R_{eD}	MPa	Dolní mez kluzu
R_{eH}	MPa	Horní mez kluzu
$R_{p0,2}$	MPa	Smluvní mez kluzu
S	mm^2	Lomová plocha
S_0	mm^2	Počáteční plocha příčného průřezu zkoušené délky
SSAB		Swedish Steel AB
S_u	mm^2	Nejmenší plocha příčného průřezu po lomu
SZW		Stretched Zone Width
t	mm	Tloušťka tělesa (materiálu)
T	K	Termodynamická teplota
TIG		Tungsten Inert Gas
TRIP		Transformation Induced Plasticity
TT	$^{\circ}\text{C}$	Tranzitní teplota
TWIP		Twinning Induced Plasticity
TZM		Tepelně mechanické zpracování
UH	-	Ukazatel hlubokotažnosti
UHSS		Ultra High Strength Steel
v_k	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$	Kritická rychlost ochlazování (kalení)
VTZM		Vysokoteplotní tepelně mechanické zpracování
Z	[%]	Kontrakce
z	mm	Hloubka tahu
ZP	-	Zásoba plasticity
ΔL	mm	Prosté prodloužení
Δr	-	Plošná anizotropie
x,y,z		Kartézské souřadnice
ε	-	Poměrné prodloužení
$\Delta\delta_3$	MPa	Tlakové napětí v rovině plechu
λ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti
σ_{\max}	MPa	Maximální napětí
σ_n	MPa	Normální napětí
σ_{nom}	MPa	Nominální napětí
τ	MPa	Smykové napětí
τ_{\max}	MPa	Maximální smykové napětí
φ	-	Logaritmická deformace
φ_t	-	Tangenciální deformace

1. ÚVOD

Technologie tváření je jednou z velmi významných a dynamicky se rozvíjejících technologií. Tato technologie je v současné době hledání co nejúspornějšího řešení zajímavá zejména z důvodů své hospodárnosti, protože v porovnání s ostatními výrobními postupy je zde velmi **malé procento odpadu**. V dnešní době se ve velkém měřítku uplatňuje především technologie plošného tváření. To je dáno prudkým rozmachem hlavně leteckého a zvláště **automobilového** průmyslu. Produkty těchto průmyslových odvětví lze počítat v řádech tisíců za den, je tedy nutné zvládnout přípravu polotovarů (zejména plechů). **Nejproduktivnější** a nejrychlejší technologií pro přípravu polotovarů z plechu je **stříhání**. Efektivita této technologie je dána jejími specifiky, kterými jsou relativně nízké pořizovací náklady strojů a nástrojů (v porovnání s jinými technologiemi), rychlost a dobrá kvalita střížné plochy (lze významně ovlivnit zejména střížnou vůlí a stavem napjatosti). Zejména výrobci automobilů jsou však nuceni stále ve větší míře zpracovávat materiály s vysokou pevností (především **vysokopevnostní oceli**). Tento jev je způsoben neustále se zvyšujícími nároky na **vyšší pasivní bezpečnost a zároveň nižší hmotnost automobilů** (což se projeví v požadovaném snížení spotřeby). Tyto protichůdné požadavky lze splnit pouze vyšším podílem vysokopevnostních materiálů využívaných v konstrukci. To s sebou přináší problém přípravy polotovarů. Zatímco doposud zpracovávané plechy s nižší pevností bylo možné bez problémů dělit stříháním, nyní se do popředí dostávají **nekonvenční technologie** dělení (**zejména řezání laserovým paprskem, případně plasmou nebo vodním paprskem**). Vzhledem k tomu, že se z ekonomických důvodů střížné (řezné) hrany dále neupravují, má způsob dělení a **charakter střížné (řezné) hrany významný vliv na následné plastické vlastnosti** přístřihů (pokud se tato hrana přímo účastní tvářecího procesu nebo je vystavena namáhání jako finální odlisovaný díl). Tváření má značný potenciál, proto jakékoliv zlepšení přípravy polotovaru vede k **zefektivnění a zkvalitnění** výrobního procesu.

Pokud jsme hovořili o stříhání jako stěžejní technologii v přípravě plechových přístřihů, pak **ocel je stěžejní materiál** pro výrobu většiny karoserií. I když zejména v poslední době se přední výrobci automobilů (zejména Audi) soustředili na vývoj „celohliníkové“ karoserie, ocel, jako tradiční konstrukční materiál, **má nezastupitelné místo**. Je nutné si uvědomit, že výsledná tuhost karoserie (ale i každé jiné součásti nebo konstrukčního celku) je limitována především mechanickými vlastnostmi použitého materiálu. Pokud nahradíme ocel slitinou hliníku s nižší pevností, musí se úměrně zvětšit nosný průřez. Ve výsledku se tak nemusí projevit výhoda nižší hustoty (měrné hmotnosti) slitin hliníku (oproti ocelím) ve výsledné úspoře hmotnosti. To platí zejména, pokud jsou k výrobě použity vysokopevnostní oceli. V

„neprospěch“ karoserií na bázi Al je nutné poznamenat, že technologie spojování (především svařování) je v porovnání s ocelí mnohem náročnější. Proto s největší pravděpodobností **zůstane ocel i nadále hlavní konstrukční materiál** a zlepšení tuhosti karoserie při současném snížení hmotnosti půjde cestou zvyšování podílu ocelí s vyšší pevností, případně využitím kombinace s jinými materiály s příznivým poměrem pevnost/hmotnost, jako jsou například plasty vyznačující se dobrou zpracovatelností (hlavně technologií vstřikování).

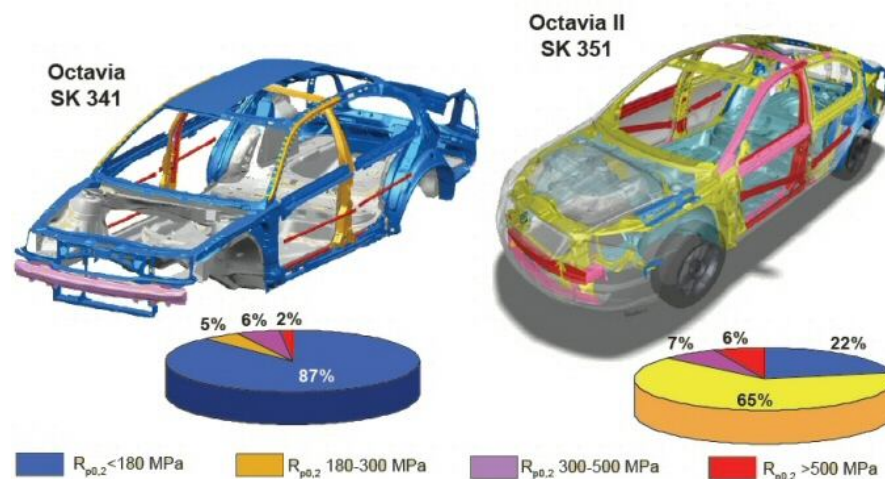
Podnětem pro vypracování této disertační práce jsou reálné problémy při lisování dílů připravovaných technologií stříhání nebo nekonvenčními technologiemi ať už v sériové nebo prototypové výrobě. Cílem je na základě experimentů popsat chování vysokopevnostních plechů při plastické deformaci a různých stavech napjatosti závislé na způsobu a podmínkách dělení. Každá z technologií je specifická svými charakteristickými rysy a znalost vlivu jednotlivých parametrů konkrétní technologie pomůže zefektivnit proces přípravy přístřihů a lisovat díly s požadovanými vlastnostmi.

2. KONCEPCE AUTOMOBILOVÉ KAROSÉRIE

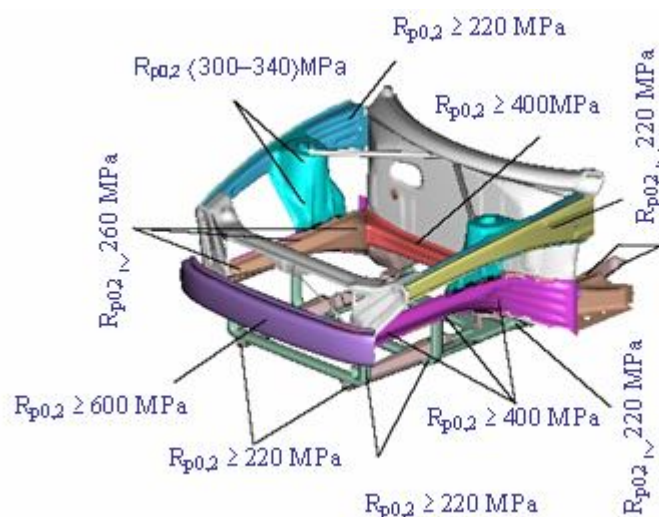
2.1. Konvenční způsoby stavby karoserie automobilů

Konstrukce karoserie doznala od počátků motorismu do současné doby velkých změn. Tou nejzásadnější je přechod koncepce karoserie s nosným rámem k tzv. **samonosné karoserii**. Koncepce s nosným rámem se sice stále ještě vyskytuje, ale u zcela specifických kategorií vozů, jako například závodních či off-roadových vozů, případně užitkových a nákladních automobilů. Naprostá většina současných osobních vozů je koncipována na platformě samonosné karoserie. Tato **koncepce přispěla k významné redukci hmotnosti** celého vozu při zachování potřebné celkové tuhosti. Karoserie jako celek je koncipována jako **svařenec z plechových výlisků** o různých vlastnostech (různé mechanické vlastnosti, povrchové úpravy, tloušťka materiálu), které jsou nejčastěji spojovány kombinací **bodového svařování** (nejvyšší podíl), svařování metodou MIG/MAG, TIG, laser, mechanicky pomocí šroubů a matic, překlátováním a zalemováním a v současné době stále častěji i lepením (obr. 2.2.). Pro zachování maximální tuhosti při minimální hmotnosti je nutné nasazovat ve větším procentu materiály s **vysokou pevností**. Především nosné části karoserie a deformační zóny jsou vyrobeny z materiálů skupiny **UHSS (Ultra High Strength Steels)** tedy materiály s nejvyšší pevností. Na skelet karoserie jsou zpravidla mechanicky připevněny tzv. pohledové díly (dveře, blatníky, kapota, atd.) Tyto periferní díly jsou vyráběny z materiálů s relativně nízkou pevností, protože výraznou měrou nepřispívají k celkové tuhosti karoserie, avšak

hlavní důraz je zde kladen na co nejlepší lisovatelnost, která je dána vysokou zásobou plasticity. Tyto materiály jsou velmi často využívány i za mezí pevnosti, protože do porušení materiálu lomem je potřeba realizovat ještě poměrně velkou deformaci. V poslední době se pohledové díly, jako jsou blatníky a kapoty, vyráběny lisováním z lehkých neželezných kovů nebo vstřikováním plastů (viz kap. 2.2.) případně z materiálů vykazujících **BH** efekt (teplem vytvrditelné materiály) [1].



Obr. 2.1. Trend zvyšujícího se zastoupení vysokopevnostních plechů



Obr. 2.2. Kombinace materiálů s různou pevností v přední části karoserie

2.2. Nové směry v konstrukci karoserie

Zatímco u karoserie jako celku je kladen důraz na maximální tuhost při minimální hmotnosti, u pohledových dílů se stále více klade důraz na snadnou vyrobiteľnost při současné nízké hmotnosti. Zejména neustále se vyvíjející design karoserie (který je nejvíce ovlivněn právě pohledovými díly) podléhající módním trendům nutí konstruktéry stále ve větší míře nasazovat materiály, které umožňují vyrábět tvarově velice složité díly. Tato skutečnost vede k využití i jiných materiálů než jen oceli. Jedná se například o již v úvodu zmíněné **slitiny Al** a stále ve větší míře i **plasty**. Nutno poznamenat, že slitiny Al mají mnohem větší využití v konstrukci podvozku, agregátu a jeho periferií včetně převodovky.

Je zřejmé, že konstruovat vozy s nízkou hmotností a přitom tuhé (tedy bezpečné) je v přímém rozporu. V této souvislosti se často vyskytuje pojem **index hmotnosti**, který definuje vztah hmotnosti karoserie vůči její tuhosti. U moderních automobilů tento index nabývá hodnot větších než 3. Například Audi A4 z roku 2001 měla tento index 2,91.



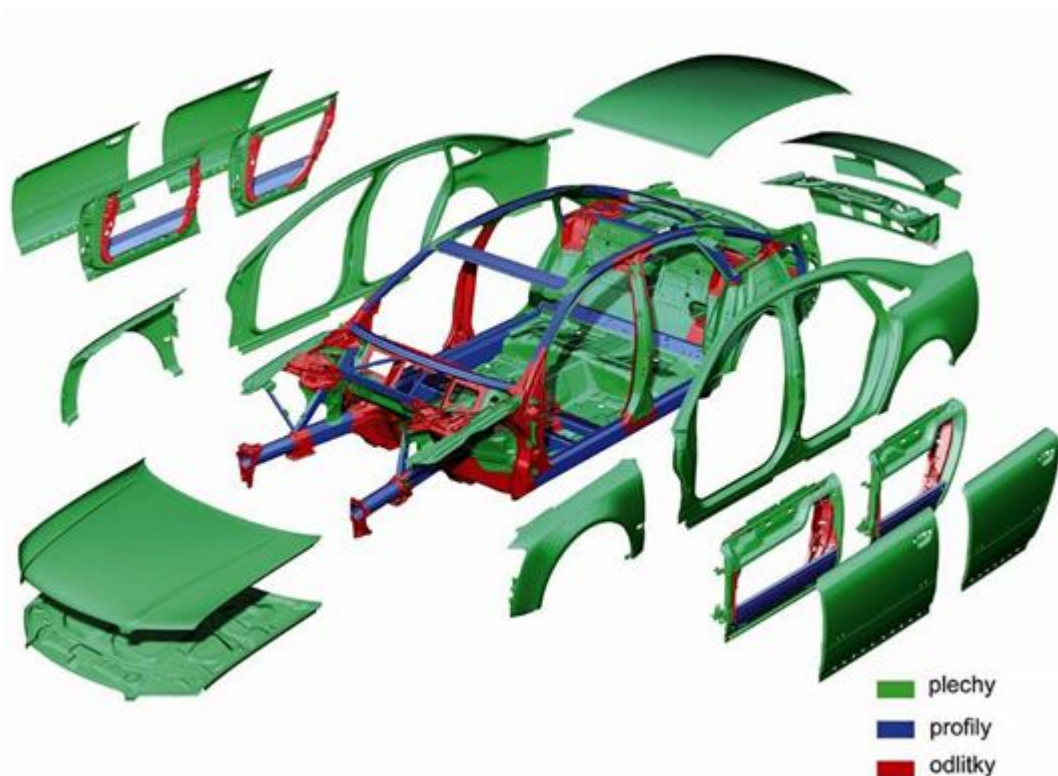
Obr. 2.3. Celohliníková karoserie vozu Audi A8 Space Frame

Celosvětový primát v konstrukci karoserie s nejlepším indexem hmotnosti vytvořila automobilka Audi se svou celohliníkovými karoseriemi. Ke konci roku 2004 vyrobila a prodala celkem 322 000 vozů s touto karoserií. Na obr. 2.3. je model A8 s karoserií označenou jako **Space Frame**. Tato karoserie je v porovnání se srovnatelnou ocelovou karoserií o **40% lehčí** a v závislosti na způsobu zpracování o **10 až 40% tužší**. Úspora hmotnosti se projeví zejména ve snížení spotřeby pohonných hmot a lepší dynamice vozu. Vysoké tuhosti karoserie je dosaženo také využitím tzv. **vyztužených profilů** (obr. 2.4.).



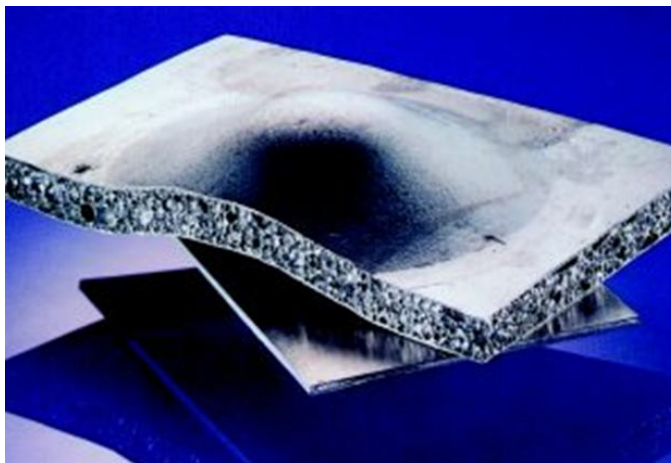
Obr. 2.4. Ukázka vyztuženého profilu

Na obr. 2.5. je vidět, že při výrobě celohliníkových karoserií se neuplatňují pouze profily nebo polotovary z plechů, ale v hojné míře i **odlitky**.



Obr. 2.5. Skladba celohliníkové karoserie (Audi A8)

Dalším významným inovačním prvkem ve výrobě karoserií je využití tzv. **lehčených kovových struktur** (obr. 2.6.). Tyto struktury se zavádějí v konstrukci nejen karoserií osobních vozů, ale také letadel a kolejových vozidel pro svou nižší hmotnost a potenciální úsporu paliva. Mají též výhodné **tepelné a zvukově izolační vlastnosti**. Jako první se objevily lehké pěnové materiály s otevřenými a uzavřenými póry z hliníku a jeho slitin. Poslední novinkou vývoje jsou lehčené struktury z dutých kuliček z hliníku a oceli.



Obr. 2.6. Příklad lehčené hliníkové struktury

V závislosti na velikosti a podílu pórů (až 85%) mají hustotu pouze **0,2 až 1,5 kg/dm³**. Pěny se vyrábějí ze směsi kovových prášků s nadouvadly. Používají se zejména jako výplně absorberů nárazu a také jako tepelné a hlukové bariéry.

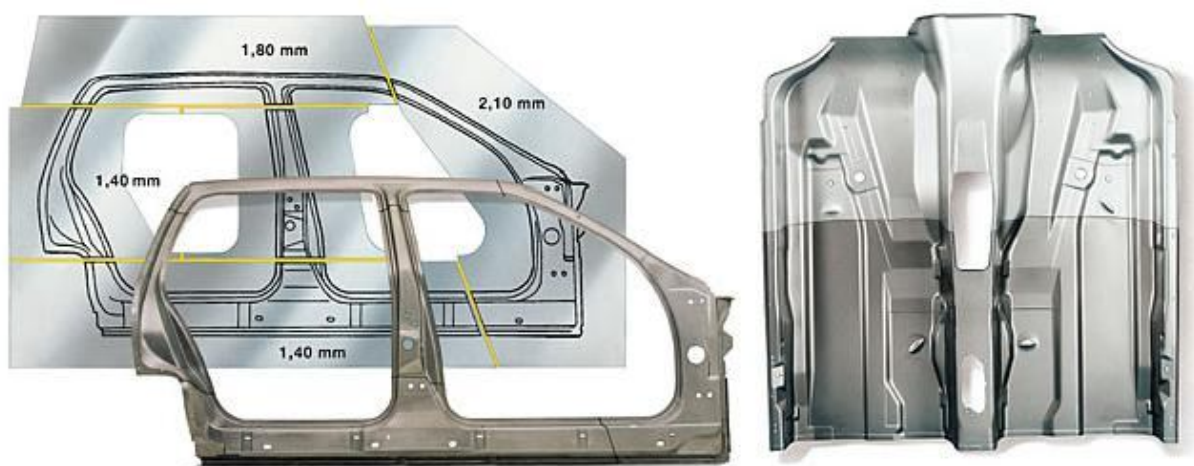
Slitiny hliníku dnes představují materiálově ukončenou skupinu a z hlediska chemického složení se nepředpokládá vývoj zcela nových slitin. Větší pozornost je třeba věnovat tepelnému zpracování. Nové postupy by měly sledovat možnost zvýšení lomové houževnatosti slitin, zlepšení jejich svařitelnosti, odolnosti proti korozi nebo snížení vrubové citlivosti.

Je třeba podotknout, že využití hliníkových slitin v konstrukci, zejména **celohliníkových karoserií**, je **velmi finančně náročné** a přináší s sebou také některé výrobní problémy, které se u ocelových karoserií nevyskytují. Mezi tyto patří složitější protikorozi ochrana, energetická náročnost výroby hutních polotovarů ze slitin Al, problémy se zadíráním povrchu při lisování, nutnost využít speciálních postupů při spojování (především svařování), povrchové úpravy atd. Lze konstatovat, že tyto konstrukce jsou doménou především luxusních automobilů nebo závodních vozů. Většina automobilek se proto snaží své výrobky stále vyrábět z klasických ocelových plechů, vylepšovat stávající konstrukce, využívat nové materiály a technologie, případně kombinovat různé materiály [2, 3].

2.2.1. Svařované přístřihy

Technologie svařovaných přístřihů („**Tailored Blanks**“) vznikla v polovině 90. let 20. století jako důsledek rostoucích požadavků na výrobu stále lehčích, ale zároveň tužších a tím pádem bezpečnějších karoserií. Jednou z cest (kromě zvyšování podílu vysokopevnostních plechů) je použít pro lisované díly přístřihy, které **kombinují více**

materiálů různých vlastností (obr. 2.7.). Jedná se zejména o tavné svařování plechů **různých tloušťek, pevností, povrchových úprav nebo textur povrchu** s cílem co nejvíce odlehčit výlisek tak, aby si zachoval požadované vlastnosti. Pro svařování se využívají především technologie, které lze snadno automatizovat a které nepotřebují přídavný materiál. Jedná se zejména o **laser, elektronový paprsek** nebo **vysokofrekvenční svařování**. Vlastní svár je tvořen nataveným materiálem obou spojovaných plechů, což má tu výhodu, že svár není převýšený a neprekáží při dalším zpracování (především při vlastním lisování). Až při zavedení výše zmiňovaných technologií svařování bylo možné v plné míře využít veškerých vlastností svařovaných přístřihů, nicméně vlastní **svarový spoj** (a jeho tepelně ovlivněná oblast) je stále **kritické místo** na přístřihu. Pro komplexní hodnocení se využívají standardní mechanické a technologické zkoušky (včetně diagramů mezních přetvoření) [4, 5, 6].



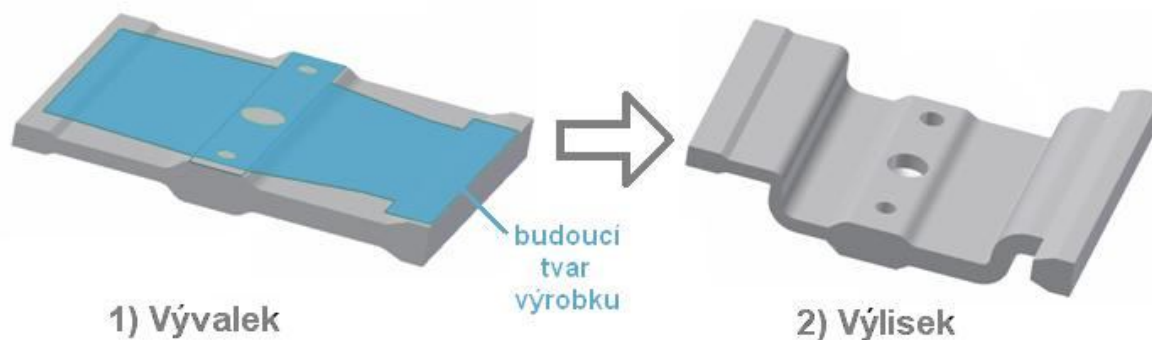
Obr. 2.7. Příklady svařovaných přístřihů (rám dveří, podlaha)

Využití svařovaných přístřihů se předpokládá především u hromadné výroby (zejména pro automobilový průmysl). Je to přímý důsledek vyšších nákladů spojených s výrobou přístřihů i jejich zpracováním. Využití stávajícího lisovacího nářadí většinou není možné vzhledem k různým tloušťkám plechu v rámci jednoho přístřihu [7, 8, 9].

2.2.2. Vývalky proměnné tloušťky

Jedním z dalších případů optimalizace tvářených dílů je využití nástřihů o **proměnné tloušťce** (obr. 2.8.). Původně konstantní tloušťka plechu je ve speciální válcovací trati **redukována** a výsledkem je pás plechu s proměnnou tloušťkou. Tímto způsobem lze pro každý výlisek navrhnout odpovídající přístřih. Tato technologie má několik předností. Je to především **pevnostní optimalizace** (vedoucí ke snížení hmotnosti dílu a úspoře materiálu),

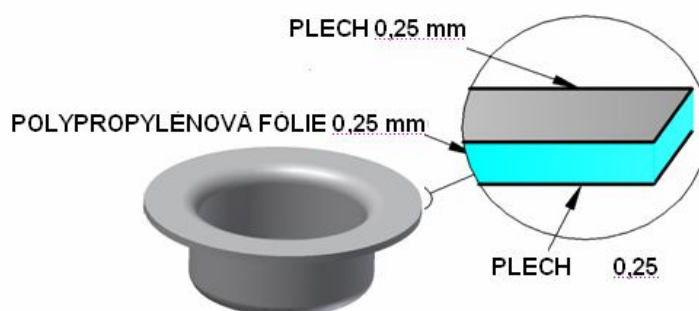
v místě předpokládaných otvorů nebo závitů není potřeba místo vyztužovat nebo navařovat matice (vyhneme se korozi a tepelně neovlivníme materiál) a v neposlední řadě zde **neexistují ostré přechody** mezi tloušťkami (na rozdíl od svařovaných přístřihů)[5, 10, 11].



Obr. 2.8. Příklad vývalku proměnné tloušťky

2.2.3. Sendvičové materiály

Materiály tohoto typu jsou tvořeny **dvěma plechy**, mezi které je vloženo **jádro** (obr. 2.9.). Toto jádro může být tvořeno buď polymerní fólií (nejčastěji **PE**, **PP**) nebo kovovou (nejčastěji hliníkovou) pěnou. Výhodou těchto sendvičů je jejich vysoká ohybová a smyková pevnost, dobré akustické a izolační vlastnosti, únavová odolnost, odolnost proti šíření trhlin a odolnost proti rázům. Sendviče lze zpracovávat **všemi technologiemi plošného tváření**. Problematické je ovšem **svařování** (zejména sendvičů s polymerním jádrem, které svařovat nelze vůbec). Problematické je dokonce i **vytvrzování laku (20 minut při 170°C)**, kdy může dojít k poškození jádra z termoplastu [5, 10, 11].



Obr. 2.9. Příklad polymerního sendviče

2.3. Vize vývoje karoserií

Je nesnadné předvídat, jakým směrem se budou výrobci automobilů ubírat při vývoji nových produktů. V době, kdy tato práce vznikala, probíhala **celosvětová ekonomická krize** spojená s všeobecným poklesem prodejnosti automobilů prakticky všude na světě. Lze pozorovat všeobecný **pokles prodejnosti** jak nových, tak ojetých automobilů. Současný automobilový svět se rozdělil na několik dílčích směrů. Renomovaní výrobci spoléhají na své **vlažkové lodi** (luxusní vozy), lze pozorovat prodejní vzestup velmi **levných automobilů** z východu a v neposlední řadě se snaží výrobci automobilů hledat **alternativní pohony** v podobě palivových (vodíkových) článků, spalováním vodíku v pístových spalovacích motorech, kombinací elektromotoru se spalovacím motorem (tzv. hybridní pohony), elektromobilů atd. Tento vývoj je charakteristický využitím všech možných technických novinek pro dosažení **maximálních užitných vlastností** automobilu při co nejnižších nákladech, což vede k nutnosti velmi racionalizovat a maximálně zjednodušovat výrobu.

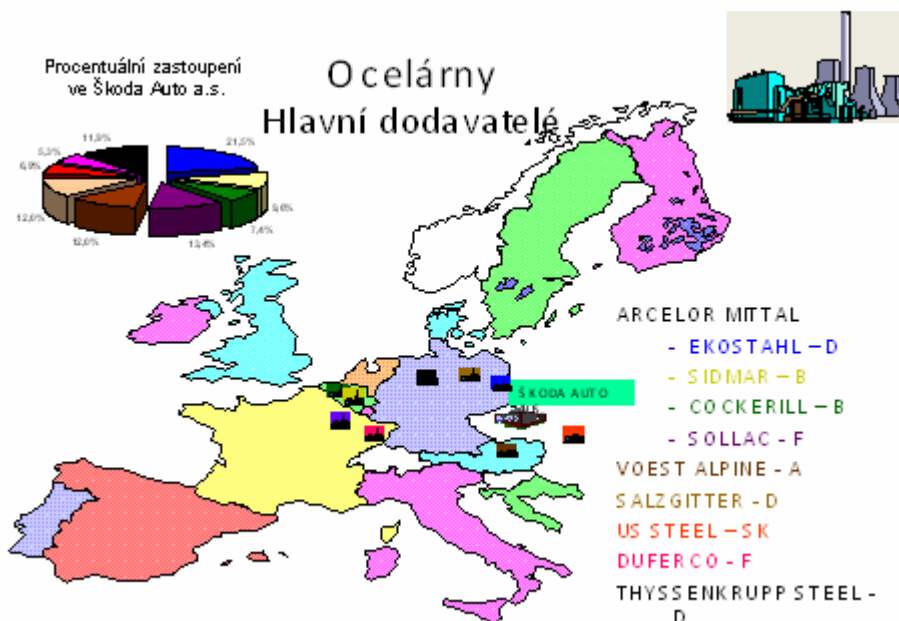
Budoucnost automobilů není jen o nových pohonných systémech, ale také o **snižování hmotnosti** a v přímém důsledku i **snižování emisí**. Japonská Mazda ohlásila plán "ořezat" budoucí generace svých automobilů až o **200 kg**. Jednak využitím lehčích materiálů, ale také pomocí nových návrhů karoserií a díky novým technologiím spojování materiálů. V dnešní době samozřejmě nelze dělat kompromisy na straně bezpečnosti, takže si tato opatření vyžádají zcela nový přístup. Právě **karoserie dozná nejpodstatnějších změn**, protože síly při nárazu musí být převedeny do jiných částí (podvozku) tak, aby bylo možné vrchní část karoserie odlehčit.auta budou rovnější s méně „záhyby“, aby bylo využito méně materiálu.

Někteří výrobci se snaží vyvíjet i zcela nové materiály. Automobilka Mazda vyvinula nový druh plastu, který je při srovnatelné pevnosti přibližně o 10 % lehčí [1, 2].

3. OCELOVÉ MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO STAVBU KAROSERIE

I když slitin hliníku se při výrobě dílů pro automobilový průmysl i celých vozů používá stále více, nelze počítat s tím, že ocel ustoupí ze scény. Právě naopak, **inovace v ocelářském průmyslu nabraly v posledním desetiletí tempo** mimo jiné i díky vyostřené konkurenci mezi výrobci materiálů. Odborníci přicházejí se zajímavými výsledky. Zjednodušeně lze říci, že "ocel je těžký materiál, ze kterého se však dnes dají vyrobit lehké součásti" díky zcela novým druhům ocelí a pevnostní optimalizaci. Realizačním výstupem intenzivního ocelářského vývoje jsou v posledních letech **extrémně pevné druhy ocelí** vykazující rekordní pevnost v tahu (R_m až 1800 MPa) při stále relativně dobrých plastických vlastnostech. Je tedy

zřejmé, že ocel z automobilové výroby nezmizí mimo jiné také proto, že v porovnání se zmiňovanými slitinami hliníku zde nejsou problémy se zadíráním při tváření ani při svařování. **Ocel tedy i nadále zůstane stěžejním konstrukčním materiálem**, a to nejen pro výrobu automobilových karoserií, ale obecně ve strojírenství. Na obr. 3.1. jsou hlavní evropští dodavatelé oceli ve vztahu ke koncernu VW (resp. Škody Auto a.s.)



Obr. 3.1. Hlavní dodavatelé plechů v Evropě

3.1. Rozdělení vysokopevnostních plechů pro stavbu karoserie

Vzhledem k tomu, že z pevnostního hlediska hrají v konstrukci karoserie zásadní roli především materiály skupiny **HSS (High Strength Steels)** a **UHSS (Ultra High Strength Steels)**, bude následující kapitola věnována právě rozdělení materiálů těchto skupin.

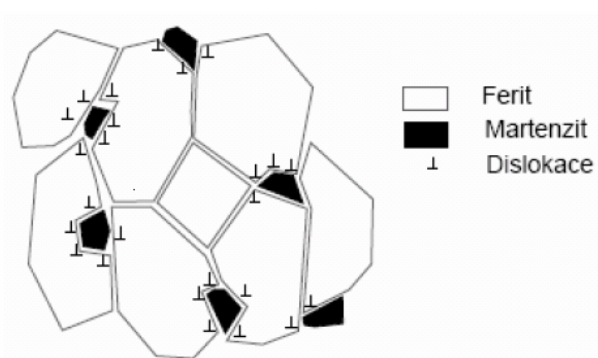
3.1.1. DP oceli

Jedná se o dvoufázové (**Dual Phase**) nízkouhlikové oceli, kde je zastoupen ve struktuře **martenzit** nebo **bainit** v podobě malých ostrůvků rozmístěných ve **feritické matici** (obr. 3.2.). Tato tvrdá fáze je rozhodující pro pevnost materiálu. Dobrá tažnost materiálu je zajištěna měkkou fází, kterou je ferit. Jeho množství může být až 90 %. Naproti tomu množství tvrdé fáze může dosahovat i 25 % z celku. Množství martenzitu má vliv na mechanické vlastnosti, zejména na mez pevnosti materiálu. Ve feritu je koncentrováno napětí, čímž dochází k jeho zpevňování. DP oceli mají **vyšší obsah uhlíku** pro lepší kalitelnost (resp. tvorbu martenzitu nebo bainitu) za běžných ochlazovacích rychlostí. Vyšší obsah C podporuje

nejen kalitelnost (vznik martenzitu), ale také zpevňuje ferit ve formě tuhého roztoku. Oceli jsou legovány **Mn**, **Cr**, **Ni** a **V**, a to jednotlivě nebo v kombinaci pro dosažení co nejlepších vlastností (kompromis mezi tažností a pevností, kalitelnost...)

U DP oceli je možno dosáhnout dobrých mechanických vlastností, kdy mez kluzu nedosahuje ani 70 % meze pevnosti (R_m až 1000 MPa). Tato skutečnost ulehčuje proces tváření, jelikož v důsledku vysokého deformačního zpevnění se snižuje riziko výrazného ztenčení stěny. Materiály se vyznačují izotropními vlastnostmi. Vysokého zpevnění je dosahováno také pomocí **BH** efektu [5, 12, 13].

Příklad použití: crash výztuhy, výztuha nárazníku aj.



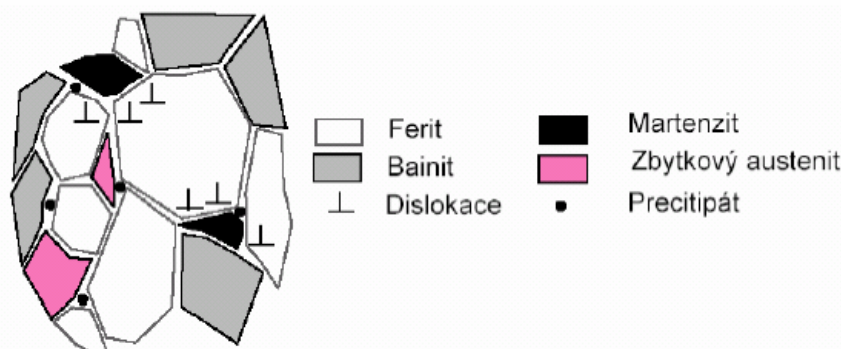
Obr. 3.2. Schematicky znázorněná struktura DP oceli

3.1.2. TRIP oceli

Název těchto ocelí je zkratkou pro **Transformation Induced Plasticity** (transformačně indukovaná plasticita). Struktura **TRIP** ocelí je tvořena **feritem**, **bainitem** a menším množstvím zbytkového nepřeměněného **austenitu** (obr. 3.3.). Množství obsaženého uhlíku má vliv na přetvoření austenitu na martenzit. Při nižším obsahu uhlíku je austenit přetvořen na martenzit už během tváření, což má za následek vysoké zpevnění oceli již během procesu lisování. Naopak při vyšším obsahu uhlíku zůstane austenit stabilní i po vylisování a začne se přeměňovat až při vnesení další deformace (napětí). Zvyšuje se tím schopnost pohltit deformační energii např. při nárazu. Oceli jsou legované **Mn**, **Si** či **Al** a jedná se o materiály, kde se opět vyskytují poddajné a tvrdé strukturní částice. Podstatou pochodů probíhajících při zpevňování TRIP ocelí je **fázová martenzitická transformace**, která je indukovaná napětím nebo deformací (odtud název oceli). Za působení vnějšího napětí přebírají oblasti austenitu zatížení a transformují na martenzit, který je současně dále deformován [3, 14].

TRIP oceli mají vysokou pevnost, současně však vynikající plastické vlastnosti. Zkoušky ukázaly, že také hnací síla na šíření trhlinek je vysoká, takže oceli jsou odolné proti

vzniku křehkého lomu. Nevýhodou TRIP ocelí je jejich **relativně nízká mez kluzu**. Po tváření mohou TRIP ocele dosahovat pevnosti až 900 MPa a svými vlastnostmi tak vyplňují prázdná místa v charakteristice tažnost – pevnost jiných skupin materiálů. Především v německy mluvících oblastech je tento druh ocelí někdy označován jako RAK.

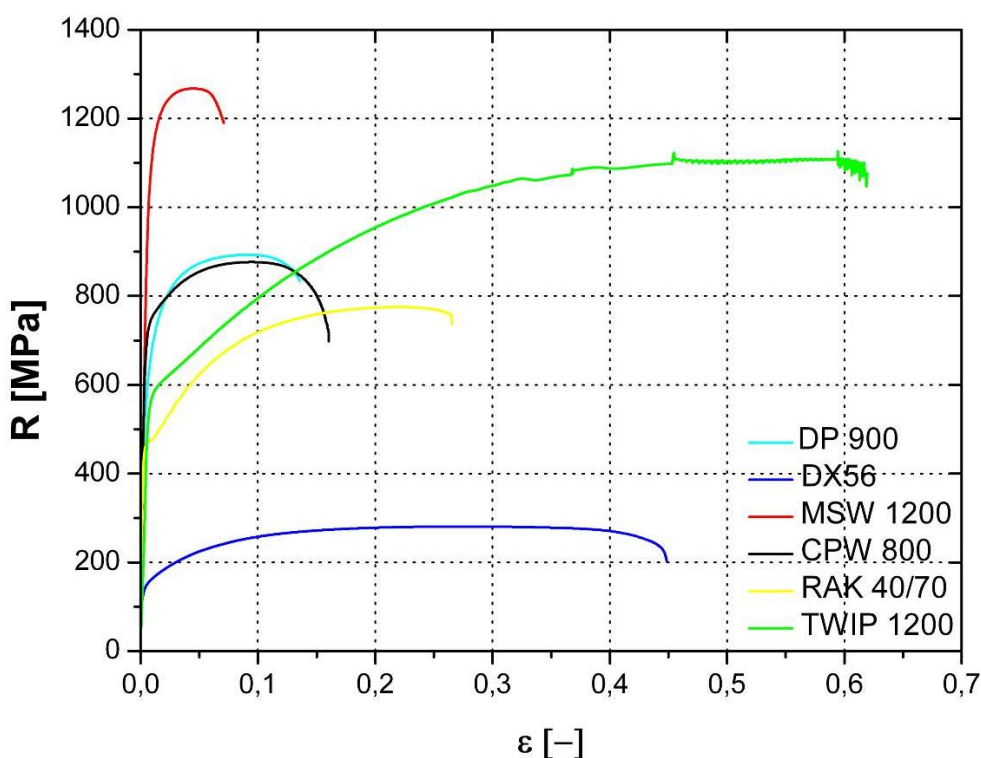


Obr. 3.3. Schematicky znázorněná struktura TRIP oceli

Výroba ocelí tohoto druhu, vyžaduje velmi precizní kontrolu deformačně – tepelného cyklu na válcovací trati. TRIP oceli se používají v konstrukci karoserie v místech, kde se **předpokládá deformace při srážce**, protože materiál je schopen zpevňovat, a tím pohltit část nárazové energie. V případě, že z materiálu jsou lisovány složitější výlisky, dosahuje se vysoké pevnosti finálního dílu. Vedle tohoto značného zpevnění vykazují TRIP oceli i BH efekt. Tento materiál se uplatňuje nejen v automobilovém průmyslu, ale i ve stavebnictví, kde nalézají uplatnění při stavbě mostů, tunelů a budov [12, 15, 16].

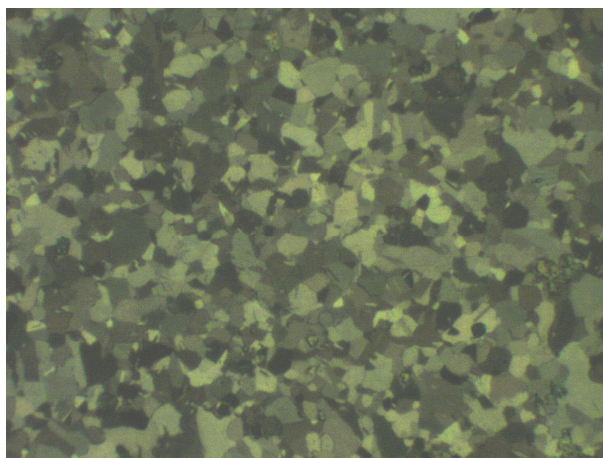
3.1.3. TWIP oceli

Snahou výrobců i konstruktérů je vyvinout materiál s vysokou pevností a zároveň tažností. Jednou z novinek v této oblasti jsou tzv. TWIP oceli (**Twinning Induced Plasticity** – plasticita indukovaná dvojčatěním). Tyto oceli obsahují chemické prvky, které ve struktuře stabilizují austenit (převážně **Mn** nebo **Ni**) a vykazují velmi nízkou energii vrstevné chyby za pokojové teploty. V důsledku toho je za běžných teplotně – rychlostních podmínek uplatňován mechanismus plastické deformace **dvojčatěním** spolu se zvyšující se deformací, která probíhá zároveň s deformací **skluzem**. Je zřejmé, že oceli s takovými vlastnostmi mohou velmi výraznou měrou přispět ke zvýšení tuhosti karoserie jako celku při cash testech. Vlastnosti tohoto materiálu ho předurčují k lisování tvarově složitých dílů (zejména výztuh a nosných částí karoserie) za studena.



Obr. 3.4. Ukázka zkoušky tahem pro různé materiály

Nutno podotknout, že se jedná o poměrně **novou materiálovou skupinu**, kde není dosud známo chování za různých podmínek. Proto se zatím nepočítá s jeho zavedením do sériové výroby. Ani zařazení není zcela jednoznačné. Z hlediska pevnostních hodnot se bezesporu jedná o materiál spadající do skupiny UHSS. Z hlediska tažnosti se řadí spíše k hlubokotažným materiálům. Na obr. 3.4. jsou velice dobře patrné rozdíly mezi jednotlivými skupinami ocelí, kde se právě prolínají pevnostní hodnoty s vysokopevnostními oceli a hodnoty tažnosti s oceli určeným zejména pro hluboké tažení. Vysoký exponent deformačního zpevnění a vysoká tažnost jsou spoluurčující pro **extrémně velkou zásobu plasticity** těchto materiálů. Za povšimnutí stojí, že k lomu dochází prakticky na mezi pevnosti, tzn., že **homogenní a celková tažnost je téměř totožná**. To má za následek, že se na mezi pevnosti nevytváří charakteristický krček, ale dochází k lomu zkušebního tělesa [17].

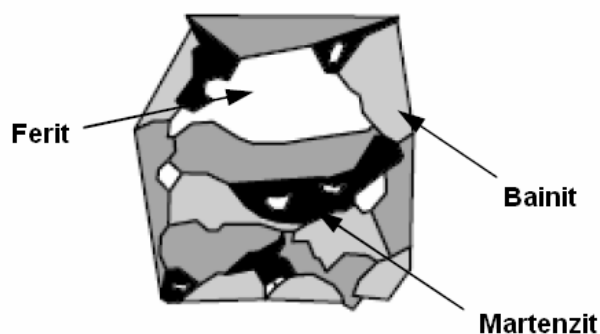


Obr. 3.5. Struktura materiálu TWIP 1200 před deformací, zvětšeno 1000x

3.1.4. CP oceli (vícefázové oceli)

CP oceli (**Complex Phase**) patří do skupiny **vícefázových ocelí** s velmi jemnozrnnou strukturou, které v tepelně-mechanickém válcovaném stavu vykazují minimální pevnost od 800 MPa. CP oceli jsou tvořeny **feritickou strukturou s vysokým podílem tvrdých fází** (obr. 3.6.). Struktura oceli obsahuje horní a dolní **bahnit** a **martenzit**. V oceli jsou obsaženy legující prvky, jako u TRIP ocelí, ale CP oceli jsou navíc mikrolegované Nb, Ti nebo V pro tvorbu jemnozrnné struktury. Kromě strukturního zpevnění se využívá také zpevnění jemnými precipitáty a BH efektu.

CP oceli jsou vhodné k tváření za studena, protože pro tyto ocele je charakteristický vysoký stupeň deformačního zpevnění, který je dán jemnozrnnou strukturou, která navíc zaručuje dobrou svařitelnost. Na rozdíl od IF ocelí s BH efektem vykazují tyto oceli velmi **dobrou rozměrovou stálost výlisků**. Tyto oceli mají vysokou úroveň dynamického zpevnění, tzn. schopnost pohlcovat deformační energii při nárazu [3, 12].

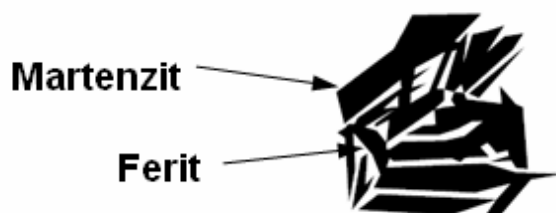


Obr.3.6. Struktura CP oceli

3.1.5. MS oceli

Martenzitické oceli (**Martenzite Steels**) se řadí do skupiny dvoufázových ocelí, které svou martenzitickou strukturu získávají během ochlazování na válcovací trati nebo následně ochlazováním ze žhacích teplot (tato struktura může být vytvořena i následně po tváření při tepelném zpracování). Vysoké meze pevnosti (která může být **vyšší než 1500 MPa**) je dosahováno vysokým podílem martenzitu v kombinaci s velice jemnozrnnou strukturou.

Tyto oceli jsou popouštěny pro zlepšení tažnosti a mohou být vysoce tvařitelné při extrémně vysokých napětích. Je možné je profilovat (ohýbat) nebo i lisovat. **Pro zlepšení kalitelnosti je v oceli ponechán uhlík** a přidávají se samostatně nebo v kombinaci prvky, jako jsou Mn, Si, Cr, Mo, B, V a Ni [13, 14, 18].



Obr. 3.7. Struktura MS oceli

3.1.6. Mangan – bórové oceli

Mangan - bórové oceli jsou novým, velmi perspektivním materiálem. Řadí se do kategorie ocelí vhodných ke kalení. Tento typ ocelí je legován především manganem a bórem. Proto jsou nazvané mangan - bórové oceli, které mají obvykle **feriticko - perlitickou strukturu** a vyznačují se svojí menší pevností ($R_m = 450 - 550 \text{ MPa}$) a dobrou tvárností ($A_{80mm} = \min 20 \%$) před tepelným zpracováním. Při tepelném zpracování je ocel zahřátá na austenitickou teplotu a při řízeném ochlazování se vyloučí struktura ve formě martenzitu, který dává oceli vysokou pevnost (R_m až **1650 MPa**) [19].

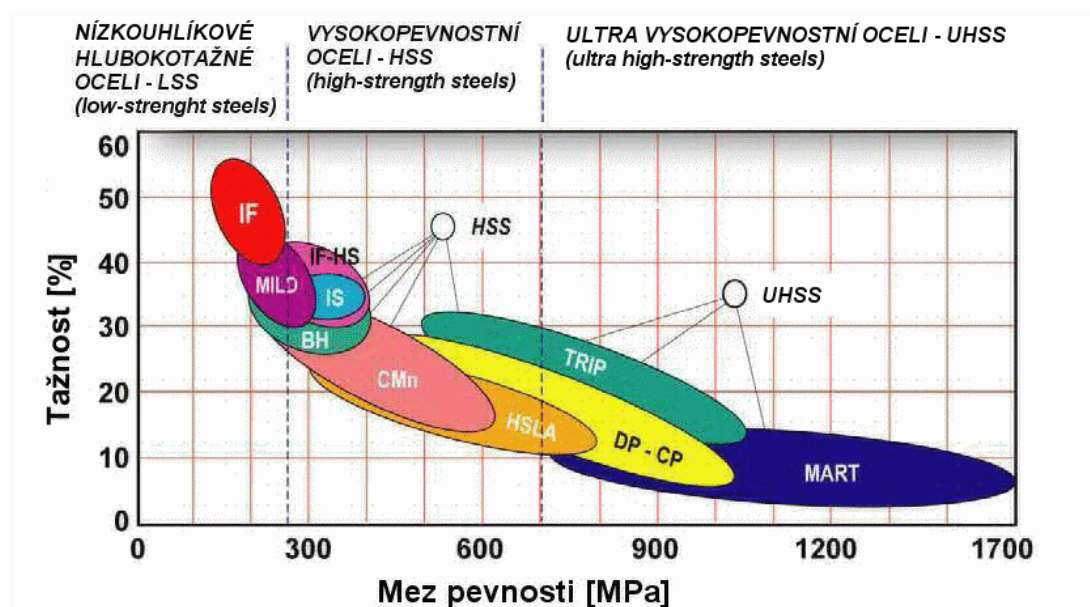
Tato ocel byla vyvinuta především kvůli snížení hmotnosti vyráběných dílů, které musí odolávat nárazu. Používá se na prvky, které zajišťují bezpečnost celé karoserie (boční výztuhy, sloupky, prahy, středové tunely atd.)

3.2. Klasifikace materiálů používaných pro stavbu karoserie

Klasifikace ocelových materiálů dle pevnosti je podle různých autorů obecně nejednotná. V tab. 3.1. je uvedeno jedno z možných dělení materiálů **podle meze kluzu**. Na obr. 3.8. je grafické znázornění jednotlivých skupin ocelí dle jejich pevnosti a tažnosti [20].

Tab. 3.1. Klasifikace ocelí dle meze kluzu

$R_{p0,2}$ [MPa]	Skupina
≤ 210	hlubokotažné – LSS (low-strength steels)
210 - 550	vysokopevnostní – HSS (high-strength steels)
≥ 550	ultravysokopevné – UHSS (ultra high – strength steels)



Obr. 3.8. Grafické znázornění jednotlivých skupin ocelí z hlediska mechanických hodnot

3.3. Možnosti zvýšení mechanických hodnot UHSS ocelí

3.3.1. Deformační zpevnění

Deformační zpevnění je jev společný všem kovovým materiálům vystavených plastické deformaci. Důsledkem deformačního zpevnění je **nárůst mechanických hodnot** materiálu, tzn. meze kluzu R_e a meze pevnosti R_m při současném **poklesu tažnosti** A_x s rostoucím přetvořením. Intenzita zpevnění je závislá na počtu aktivovaných skluzových systémů. Pokud je přetvoření realizované jen v jednom skluzovém systému, výsledné zpevnění je minimální. Pokud je aktivováno více skluzových systémů, vzrůstá pak i velikost zpevnění [3, 21].

3.3.2. Zpevnění tuhého roztoku

Podstatou tohoto zpevnění je **různá velikost atomů přísadových prvků**. Atomy prvků tvořící substituční tuhé roztoky výrazně neovlivní mechanické vlastnosti výsledné slitiny. Takové prvky jsou například Ni, Cr, apod. Naopak přidání prvků, které tvoří **intersticiální tuhé roztoky**, způsobí výrazné změny ve výsledných vlastnostech slitiny. Je to způsobeno deformací elementární mřížky základního kovu. Zpevňující účinek vzniká tím, že dislokace potřebují dostatečnou energii k překonání těchto překážek [3, 22].

3.3.3. Zpevnění zjemněním zrna

U reálných polykrystalických materiálů jsou hranice zrn neprůchodné pro dislokace. Na těchto hranicích se dislokace kupí a napětí potřebné k další deformaci se zvyšuje. Pokud budeme uvažovat jemnozrný materiál, počet těchto dislokačních shluků bude vyšší. Tím stoupne i velikost napětí potřebného k další deformaci [3].

3.3.4. Zvýšení pevnosti u dvou a vícefázové struktury

Nárůstu pevnosti je dosaženo u extrémně jemné struktury obvykle pomocí kontinuálního žíhání po válcování při martenzitické teplotě. Zatímco dochází k rekrystalizaci zrn, karbidy přítomné na jejich hranicích se rozpouštějí a předávají uhlík kovové matici. Současně se objevuje austenitická fáze. Rychlým ochlazováním proudem vody se austenit mění na martenzit či bainit. Tyto fáze jsou rovnoměrně rozprostřeny ve formě ostrůvků ve feritické matici [3, 22].

3.3.5. Zvýšení pevnosti pomocí tepelně – mechanického zpracování

Vlastnosti ocelí je možné zlepšit kombinovaným účinkem tváření a tepelného zpracování – **tepelně mechanickým zpracováním (TZM)**, často také termomechanické zpracování. Tvářením austenitu může dojít k podstatnému zjemnění jeho zrna, tedy i produkty následujících přeměn (martenzit, ferit, perlit) budou jemnější. Dalším důsledkem tváření je zvýšená hustota dislokací v austenitu, které přecházejí do produktů přeměny austenitu popř. modifikují i kinetiku a mechanismus jeho přeměn [15].

Mezi nejznámější postupy TZM patří následující technologické varianty:

- nízkoteplotní tepelně mechanické zpracování – NTMZ,
- vysokoteplotní tepelně mechanické zpracování – VTMZ,
- izoforming,
- řízené válcování a ochlazování.

Mezi nejpoužívanější tepelně mechanické zpracování u plechů s vyšší a vysokou pevností patří **řízené válcování a ochlazování**. Válcovací i doválcování teplotou a velikostí úběru lze řídit procesy dynamické a statické rekrytalizace austenitu. Vhodně zvolenou rychlostí ochlazování austenitu z doválcovací teploty lze ovlivnit transformaci jemnozrnného austenitu na jehlicový ferit anebo na ferit a perlit s výhodnou kombinací pevnosti ostatních mechanických vlastností. Teplotou svinování lze ovládat i úroveň precipitačního zpevnění plechů z mikrolegovaných ocelí [15]. Podrobněji bude o termomechanickém zpracování pojednáno v kap. 9.2.1.

4. MOŽNOSTI PŘÍPRAVY PLECHOVÝCH PŘÍSTŘIHŮ

4.1. Mechanické dělení – stříhání

Stříhání je **základní operací dělení materiálu**, která je u kovů zakončena porušením – lomem v ohnisku deformace. Vlastní plastické přetvoření je sice průvodním, ale nežádoucím jevem. Materiál se odděluje postupně nebo současně podél křivky stříhu dané relativním pohybem dvou břitů, které vytvářejí nutné střížné – smykové napětí. Základním předpokladem kvalitního stříhu je **lokalizace smykového napětí do místa stříhu** a dobrá kvalita střížných hran nástroje. Zároveň je nutné zohlednit charakter stříhaného materiálu (zejména mechanické vlastnosti) a s tímto ohledem volit vhodnou velikost střížné vůle.

Proces stříhání má několik fází:

V první fázi, bezprostředně po dosednutí střížníku na střížný materiál, **dochází k pružné deformaci**, kde se napětí pohybuje pod mezí kluzu. Hloubka vniku střížníku do stříhaného materiálu závisí zejména na jeho mechanických vlastnostech a bývá v rozmezí 5 až 8% tloušťky stříhaného materiálu. Dvojice sil mezi hranami střížníku a střížnice způsobuje ohyb.

V **druhé fázi** je napětí ve směru vnikání větší, než je mez kluzu kovu a **dochází k trvalému plastickému přetvoření**. Podle druhu kovu a jeho mechanických vlastností je hloubka plastického vniknutí 10 až 25% tloušťky stříhaného materiálu.

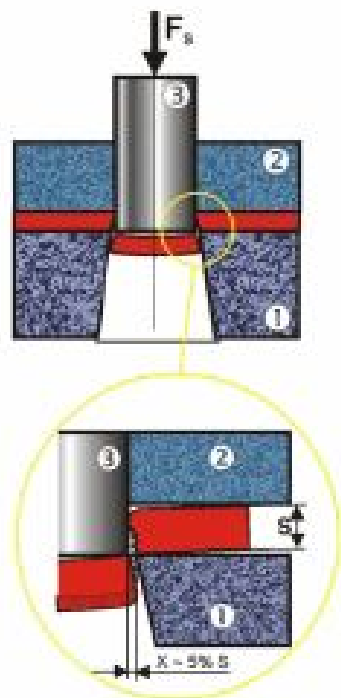
Ve **třetí fázi** dosáhne napětí meze pevnosti ve stříhu τ_s . Nejdříve vznikne tzv. nástřih, tj. tvoření trhlinek, které je podporováno tahovým normálním napětím ve směru vláken. Trhliny se rychle šíří až dojde k oddělení výstřížku. Rychlost vzniku a postupu trhlin je závislá na mechanických vlastnostech stříhaného materiálu a na velikosti střížné vůle. Tvrdý a křehký materiál se oddělí rychle při malém vniknutí střížných hran (přibližně 10% tloušťky materiálu). U měkkých a houževnatých materiálů dochází ke vzniku trhlin – nástřihu a jejich šíření pomalu a hloubka vniknutí střížných hran v okamžiku oddělení bývá až 60% tloušťky materiálu. Při stříhání s normální vůlí se trhliny po nástřihu šíří tak, že se v okamžiku stříhu setkávají.

Po krátké dráze elastického vniknutí břitů (napěchování kovu pod břitem) dochází k plastickému přetvoření. I když se střížná plocha zmenšuje, dochází vlivem lokálního zpevnění k plynulému nárůstu síly. Po vzniku nástřihu (první porušení trhlinami) nastává ještě mírný a plynulý pokles síly až po hloubku vniknutí h_s , kdy dojde k úplnému porušení lomem a k následnému oddělování výstřížku s výrazným poklesem síly. Lokální snížení výrazného gradientu poklesu střížné síly je způsobeno vzájemným otěrem vytvořené plochy. Zpevněná oblast zasahuje do 20 až 30% tloušťky stříhaného materiálu.

4.1.1. Charakteristika konvenčního stříhání

Pokud je vůle mezi střížníkem a střížnicí přibližně **10%** tloušťky stříhaného materiálu a do místa stříhu není vneseno tlakové napětí v rovině plechu, hovoříme o konvenčním (klasickém) stříhání. Jakost povrchu střížné hrany, jakož i velikost jednotlivých pásem jsou odlišné od přesného stříhání. Převládá zde podíl fáze utržení a kvalita střížné plochy je proto nízká. Charakteristický je zejména vznik otřepu. Pokud je střížná mezera příliš velká, může dojít k tomu, že se materiál „vklení“ vlivem ohybového momentu mezi nože a vznikne tak zmetek. Tomuto lze zabránit buď použitím přidržovačů nebo zmenšením střížné mezery. Na velikosti střížné mezery (tedy i na charakteru střížné plochy) závisí následné plastické vlastnosti materiálu. Ty závisí hlavně na vzniku otřepu a na velikosti deformačního zpevnění v okolí střížné plochy. Při následném tváření hlubokotažných plechů se trhlina šíří od otřepu, který představuje nejmenší objem materiálu v namáhaném průřezu. Pokud je tedy plech připravován technologií stříhání s velkou střížnou vůlí, vznikají na střížné hraně otřepy, které ve svém důsledku nepříznivě působí na následné plastické vlastnosti. Obecně lze tedy

doporučit u těchto materiálů co nejmenší střížnou mezeru (samozřejmě s ohledem na výrobní tolerance nástrojů).



Obr. 4.1. Schéma konvenčního stříhání

Při dělení materiálů ze skupiny UHSS je situace poněkud jiná. U těchto materiálů nevzniká výrazný otřep, ale okolí střížné plochy silně deformačně zpevňuje. Tyto materiály mají poměrně malou tažnost, proto jsou velmi brzy vyčerpány plastické schopnosti materiálu v oblasti čistého smyku. Proto neplatí, že tyto materiály je vhodné dělit technologií stříhání s malou střížnou mezerou, naopak se následné plastické vlastnosti dají zlepšit jejím určitým zvětšením. Je tedy nutné nalézt vždy optimální velikost střížné mezery. Limitujícím faktorem při stříhání těchto materiálů je kromě pevnosti a tvrdosti také tloušťka materiálu [23, 24].

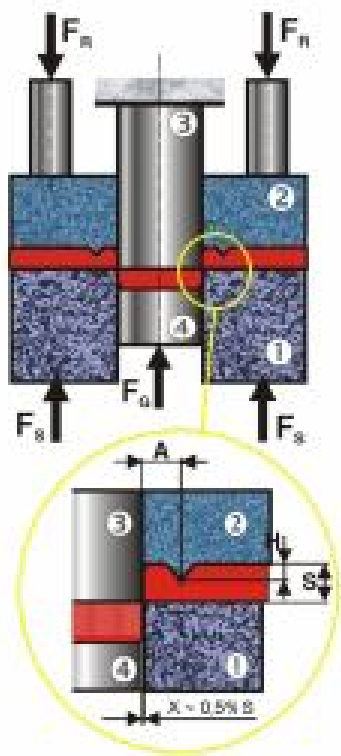
4.1.2. Charakteristika přesného stříhání

Technologie přesného stříhání je charakterizována **malou střížnou vůlí** (přibližně 1% tloušťky stříhaného materiálu) a **vnesením tlakových napětí** do místa stříhu. To je většinou realizováno pomocí nátláčné hrany v kombinaci se spodním přidržovačem. Použitím přidržovače s nátláčnou hranou se vytvoří přídatné tlakové napětí $\Delta\delta_3$, které výrazně změní poměry v rovinné napjatosti uzavřeného stříhu. Důsledkem je dosažení záporné hodnoty složky normálního napětí $-\delta_n$, která se snaží vznikající trhliny i při jejich šíření ve směru τ_{\max} uzavírat.

Celková síla při přesném stříhání bude složena ze tří složek. Vlastní střížné síly F_s , síly přidržovače F_p a síly vyhazovače F_v , které musí střížník překonat a které brání předčasnému dolomení výstřížku před koncem zdvihu.

Z výše uvedeného je zřejmé, že použitím přidržovače s nátláčnou hranou se zvýšilo příčné tlakové napětí δ_3 a změna schématu napjatosti způsobila vznik tlakového normálního napětí $-\delta_n$, které brání rozevírání trhliny a tímto zadržením lomu zvýšilo kritické přetvoření.

Dále došlo k prodloužení hloubky plastického stříhu na celou tloušťku plechu při

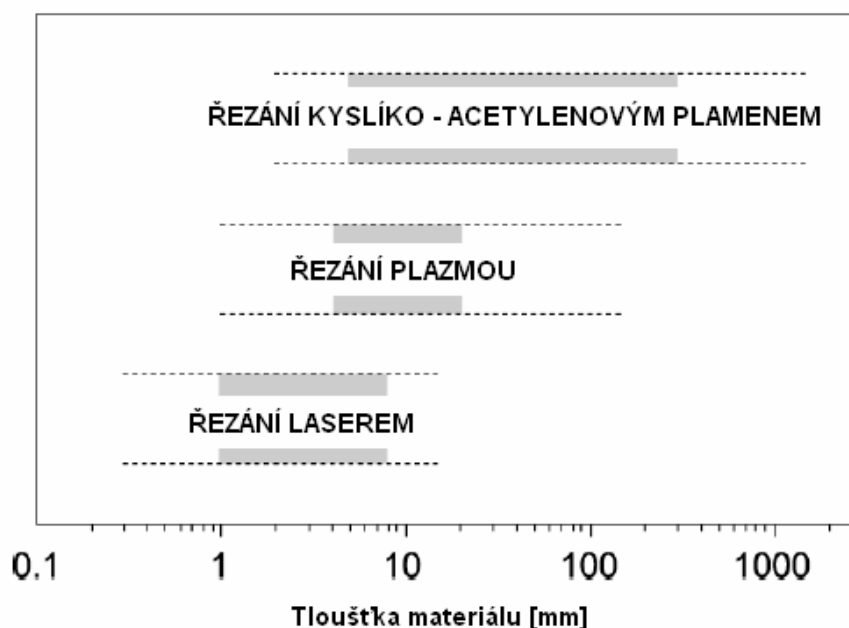


snížení vlastní střížné síly. Konečným důsledkem přesného stříhání je zvýšená kvalita povrchu střížné plochy a přesnost stříhu při snížené drsnosti. Praktická doporučení vyplývají z geometrie nátlčné hrany. Dále platí, že do tloušťek plechu 4mm se používá nátlčná hrana pouze na přidržovači (nátlčné desce). V rozmezí tloušťek 3 až 7mm se podle zkušeností používá nátlčná hrana i na střížnici. Hraniční tloušťka je 5mm. Tyto úpravy střížného nástroje zaručí maximální pásmo čistého smyku. Technologie přesného stříhání se využívá v případech, kdy je požadována maximální přesnost stříhaných dílů a tam, kde záleží na vlastnostech střížné hrany (zejména jakosti povrchu) [23, 24].

Obr. 4.2. Schéma přesného stříhání

4.2. Nekonenční způsoby dělení plechu

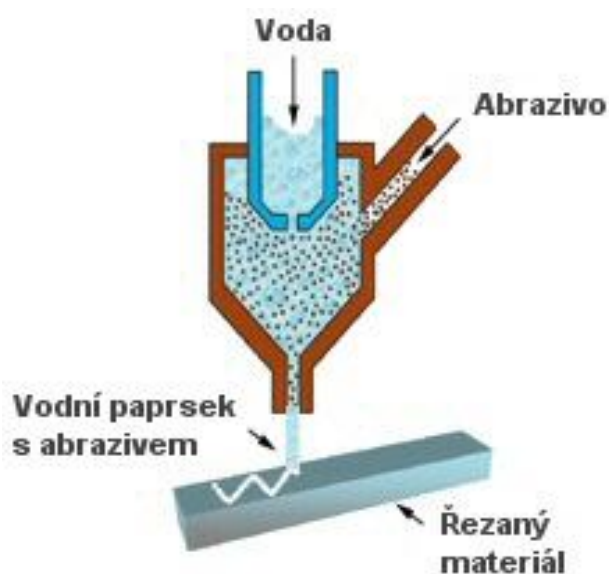
V reálných podmínkách (s ohledem na efektivitu procesu stříhání) se tato technologie používá nejčastěji pro dělení plechů do pevnosti přibližně **700 MPa a tloušťky do 1,5 mm**. Vysoký objem materiálů s vyšší pevností i tloušťkou znamená nutnost dělit tyto materiály některou z nekonvenčních technologií, mezi které patří například řezání **vodním paprskem, laserem a plazmou**. Z tohoto pohledu lze dále tyto technologie dělit na tzv. „teplé“ (**laser, plasma**) a „studené“ (**vodní paprsek**). U „teplých“ technologií platí pro výběr zejména kritérium tloušťky (obr. 4.3.). Jednotlivé technologie se co do tloušťky materiálu sice překrývají, ale zásadní vliv má množství vneseného tepla do místa řezu. Pořadí těchto technologií koresponduje s pořadím na obr. 4.3., tzn., že nejmenší množství tepla dodává do děleného materiálu laser, naopak nejvíce řezání plamenem (tento způsob se používá především pro dělení silnějších materiálů, kde není požadována vysoká kvalita řezné hrany).



Obr. 4.3. Možnosti využití „teplých“ technologií v závislosti na tloušťce řezaného materiálu

4.2.1. Vodní paprsek

Během posledních desetiletí prošla tato technologie prudkým vývojem, díky kterému je v současnosti možno dělit a opracovávat vodním paprskem prakticky **jakýkoli materiál**, ať už se jedná o kovy, keramiku, skla a nebo i kompozity či plasty. Řezání vodním paprskem, na v současnosti dosažené technologické úrovni, přináší nejen celou řadu výhod oproti jiným postupům, ale má stále i další možnosti svého rozvoje.



Princip řezání vodním paprskem (obr. 4.4.) spočívá ve stlačení řezné kapaliny (vody) na **tlak 500 až 4000 barů**. Při takto vysokých tlacích je voda stlačitelná **až o 13%**. Stlačená kapalina je vedena do trysky v řezací hlavě rychlostí přibližně **tříkrát vyšší**, než je rychlost zvuku. Samotný řezací tlak vychází z vysokotlakého čerpadla, které vhání vodu pod tlakem do řezací hlavy, kde se pomocí trysky usměrňuje v paprsek o průměru 0,7 - 1,5 mm. Při zpracování měkkých materiálů se používá čistý vodní

Obr. 4.4. Princip řezání vodním paprskem

paprsek. Pro ostatní případy je třeba použít abrazivní paprsek nebo též **AWJ** (**A**brasive **W**ater **J**et). Vhodnou příměsí je například granát. Pohyb řezací hlavy a tedy celá dráha řezu je řízena počítačem dle předem sestaveného programu. Podkladem jsou soubory AutoCAD ve formátu **DXF** nebo **DWG**. Je možné provádět i tvarové složité řezy během jedné operace, a to i v 3D prostoru - tzv. **AWJ modelování**. Nutno poznamenat, že využití vodního paprsku není pouze v dělení různých materiálů, ale lze jej použít i pro frézování, gravírování, ozdobnému popisování (výroba reklamních předmětů) apod. Standardní **přesnost výřezu je $\pm 0,2$ mm**, pro řezání AWJ se hodnoty drsnosti povrchu mohou pohybovat v oblasti pod $3,2 \mu\text{m}$ s dosaženou přesností až $\pm 0,04$ mm/m, přičemž standardní přesnost je dosahována v rozmezí $\pm 0,1$ až $\pm 0,2$ mm.

Na obr. 4.5. je vidět rozdílná kvalita řezu (Q_1 až Q_5) závislá na zvolených parametrech řezání. Obecně je kvalita řezné plochy dána parametry řezání, druhem použitého abraziva a charakterem řezaného materiálu.



Obr. 4.5. Závislost kvality řezu na parametrech řezání vodním paprskem

Technologie dělení vodním paprskem má ze všech nekonvenčních technologií nejširší možnosti využití z hlediska řezané tloušťky i druhu zpracovávaných materiálů [25].

Výhody:

- technologie prakticky není omezena tloušťkou ani řezaným materiálem (běžně 200 mm),
- nedochází k tepelnému ovlivnění a pouze k minimálnímu deformačnímu zpevnění,
- nevznikají škodlivé emise,

- vysoká přesnost řezu a malé ztráty materiálu (malý prořez),
- odpadá potřeba dalšího obrábění (včetně srážení hran),
- vysoká kvalita, přesnost a rychlost řezu (zejména u AWJ),
- možnost 3D obrábění (modelování),
- snadná automatizace.

Nevýhody:

- koroze materiálů,
- vyšší hladina hluku,
- ekonomická nákladnost,
- podkosení řezné hrany (kolem 3°),
- specifický charakter řezné hrany (rýhování s různě velkým poloměrem zaoblení - obr. 4.6.),
- možnost výskytu nedořezaného trojúhelníkového útvaru - tzv. „nosu“, vznikajícího ve spodní části řezné spáry při vycházení paprsku z řezu.

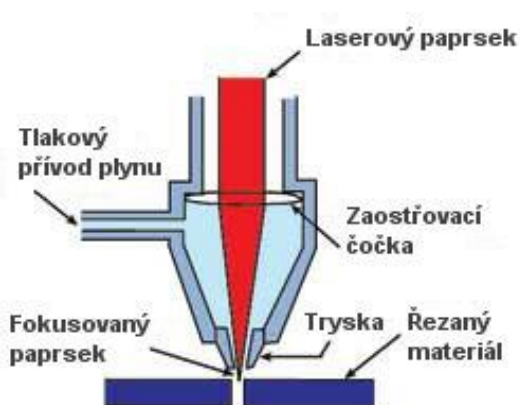


Obr. 4.6. Detail řezané plochy s dobře patrnou strukturou

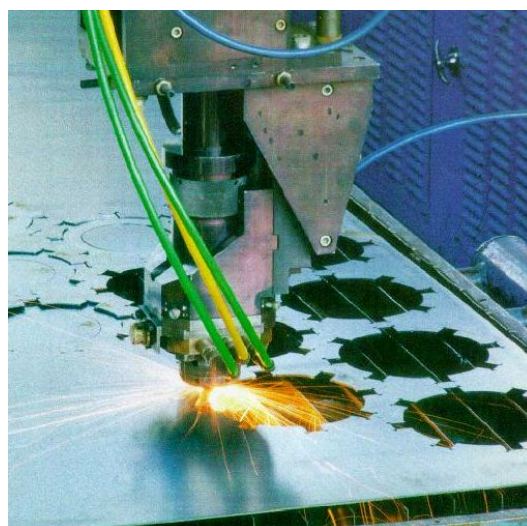
4.2.2. Laser

Slovo **LASER** sestává z počátečních písmen anglického označení „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation), tedy „zesílení světla stimulovanou emisí záření“. Při laserovém řezání je snahou **odpařit materiál** co nejrychleji při zachování co nejmenší oblasti zasažené tepelnými účinky. Nejpoužívanějšími lasery v tomto oboru jsou kontinuální CO₂ lasery se středním výkonem do 15 kW. Ve většině průmyslových aplikací využívajících laserové řezání se přivádí koaxiálně s laserovým svazkem na místo řezání proud plynu. Pro řezání **kovů se přivádějí reaktivní plyny**, jako např. kyslík. **Dochází pak k exotermické**

reakci, která urychluje proces řezání. Tímto způsobem jsou řezány např. titan, oceli s nízkým obsahem uhlíku a nerezové oceli. Pro řezání nekovových materiálů, jako jsou keramika, plasty a dřevo, je na místo řezání přiváděn inertní plyn, sloužící pouze k odstraňování roztaveného a odpařeného materiálu. Tímto způsobem lze řezat rovněž textilní materiály, papír a sklo. Výhodou laserového řezání je velká rychlost, řezání různých tvarů, možnost automatizace, bezkontaktní působení, dobrá kvalita řezu a malá zóna tepelného ovlivnění.



Obr. 4.7. Princip laserového řezání



Obr. 4.8. Aplikace plynového laseru při tvarovém řezání plechu

I když všechny lasery pracují na stejném základě (stimulované emisi), liší se velmi výrazně svou konstrukcí i vlastnostmi. Pro jejich rozdělení do skupin můžeme zvolit různá kritéria, např.:

- **skupenství aktivního prostředí** (pevná látka, kapalina, plyn, polovodič),
- **vlnová délka** (submilimetrové, infračervené, viditelné světlo, ultrafialové, rentgenové),
- **excitace – buzení** (optickým zářením, elektrickým polem, chemickou reakcí, elektronovým svazkem atd.),
- **počet energetických hladin** (dvou, tří a vícehladinové),
- **režim práce** (pulzní nebo kontinuální).

Z těchto kritérií zůstává prakticky beze změny jen rozdělení dle prvního kritéria. S vývojem stále nových typů se ostatní neustále doplňují, mění a modifikují. V následujícím textu bude popsáno pouze několik základních typů laserů, která se v technické praxi vyskytují nejčastěji [26].

Plynové CO₂ lasery - patří k nejstarším typům laserů. Jejich aktivní prostředí tvořené plynem nebo směsí plynů nabízí z tohoto pohledu širokou nabídku typů. Pro průmyslové užití se nejvíce uplatňují lasery s oxidem uhličitým CO₂ (vyzařování 10,6 μm), které patří k nejvýkonnějším typům laserů vůbec. CO₂ lasery se středním výkonem 500 – 6000 W jsou používány většinou pro řezání ocelových plechů do tloušťky 25 mm (dosáhlo se i 40 mm), řezání trubek a profilů. Pro svou flexibilitu a snadné programování řezu jsou vhodné i při malých a středních sériích. Při menších tloušťkách je možné řezat i hliník (do 15 mm) a mosaz (do 8 mm). Při výkonech nad 6000 W se CO₂ lasery používají zvláště pro svařování u automatizované velkosériové výroby, kde se dosahuje hloubky svaru až 20 mm. Pod výkonovou hranicí 500 W se CO₂ lasery užívají většinou pro opracování nekovových materiálů, případně u kovů pro svařování, řezání a jiné opracování materiálů menších tloušťek.

Podstatnou nevýhodou CO₂ laserů oproti pevnolátkovým nebo diodovým je skutečnost, že nemohou vést výstupní paprsek od jeho zdroje k místu užití optickým vláknem. Zvláště se tento nedostatek začal projevovat u robotizovaných pracovišť. Na základě těchto potřeb vzniklo několik nových univerzálních řešení s novou koncepcí umístění laseru přímo na rameno kloubového robotu, umožňující zkrátit optickou cestu paprsku při nižším počtu průvodních zrcadel. Dopomohlo k tomu i snížení hmotnosti vlastních laserů a zároveň i zvyšování nosnosti robotů. Jako nejvýhodnější laser se v současné době jeví koncepce difúzního chlazení s koaxiálně uspořádanými elektrodami a integrovaným zásobníkem plynu.

Pevnolátkové Nd:YAG lasery - patří svou nabídkou rovněž k nejužívanějším typům průmyslových laserů v rozsahu výkonů do 10 kW. Na základě jejich principu se v poslední době objevují u této skupiny laserů některé zásadní novinky, které mohou přinést v budoucnosti nečekaný zvrat v nasazování dosud standardních typů laserů. Aktivní prostředí této skupiny laserů tvoří pevné krystalické (případně amorfni látky) dopované příměsí vhodných plynů. U klasického provedení těchto laserů se aktivní prostředí z těchto materiálů formuje do tvaru válečku. Nejčastěji užívaným typem laserů z této skupiny jsou Nd:YAG lasery (vyzařování na vlně 1,064 μm), kde ytрито – hlinitý granát (YAG) je dopován ionty neodymu Nd. U těchto typů laserů se výkon v kontinuálním provozu pohybuje přibližně do 6 kW, v pulzním provozu se dá dosáhnout špičkových výkonů kolem 10⁹ W a při užití kaskádových zesilovačů i vyšších. Jejich výhodou na rozdíl od plynových laserů je zde možnost vedení výstupního paprsku optickým vláknem, což dává obzvláště dobré možnosti pro aplikace u robotizovaných a automatizovaných pracovišť. Pevnolátkových laserů

s výkonem nad 2000 W se používá především ke svařování (svařování dílů karoserie včetně dílů z různých materiálů a o různých tloušťkách – způsob Tailored Blanks). Pevnolátkových laserů v rozsahu výkonů 200 až 2000 W se užívá zvláště k řezání a svařování a v poslední době stále častěji i ke spékání nebo natavování materiálů v procesech Laser Prototyping, Laser Tooling a Laser Manufacturing. Lasery nižších výkonů jsou vhodné pro práci v jemné mechanice a elektrotechnice, popisování a mikroopracování.

Výkonné diodové lasery - polovodičové lasery s vyzařováním na vlnové délce 790 – 980 nm jsou pro průmyslové technologie vhodné při dostatečném výkonu (v sestavě se dosahuje až 8 kW) a oproti jiným typům dosavadních technologických laserů nabízejí především menší rozměry. V obvyklém výkonovém rozpětí do 250 W se používají k řezání a svařování plastů a kovových fólií, případně k pájení. Při kW výkonech také k vytvrzování, natavování, svařování s vedením tepla a pájení natvrdo.

Diodové výkonové lasery mají dobrou účinnost, nízké investiční i provozní náklady a vysokou životnost. Odlišnou vlastností diodových laserů oproti jiným typům je v zásadě pravoúhlý profil zaostřeného paprsku s téměř konstantním rozložením intenzity záření. U těchto laserů je možné poměrně snadné přeladování v širokém rozmezí vlnových délek, které se docílí změnou zastoupení jednotlivých prvků v polovodiči.

Excimerové lasery - lasery ze skupiny molekulárních laserů vyzařují v oblasti spektra přibližně od 157 do 351 nm. Pracují s halogenidy nebo oxidy vzácných plynů a jejich buzení bylo až do nedávna zásadně pulzní. Pro svou krátkou vlnovou délku v ultrafialové části spektra s dobrou fokusací paprsku a krátké pulzy poskytují tyto lasery opracování s ostrými okraji, přičemž jen minimálně zatěžují okolí dopadu paprsku. Používají se proto především pro práce v oborech jako elektronika a jemná mechanika.

V závislosti na druhu laseru, jeho aplikaci a konstrukci jsou **výkonové hustoty** v intervalu 10^8 až $10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ [27, 28].

Výhody:

- nízká hodnota přebytečného tepla a z toho vyplývající tenký řez (0,2 – 0,01 mm),
- úzká tepelně ovlivněná zóna,
- široké spektrum řezaných materiálů,
- řez s minimální plastickou deformací.

Nevýhody:

- omezující faktor je tloušťka řezaného materiálu,
- tepelně ovlivněná zóna,
- vysoká cena zařízení a vysoké provozní náklady.

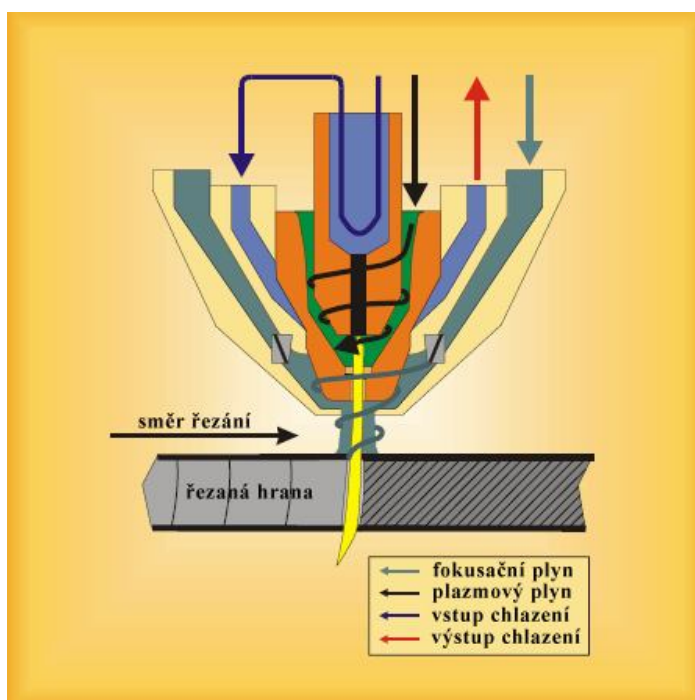
4.2.3. Plazma

Jako plazmu označil speciální stav plynů poprvé v roce 1923 francouzský fyzik I. Langmuir. Plazma je **elektricky vodivý plyn o vysoké teplotě, který je tvořen kladně nabitými jádry atomů (ionty) a záporně nabitými elektrony**. Někdy bývá plazma označována jako čtvrté skupenství látek. Vnesením tepelné energie měníme u látek skupenství z tuhého na kapalné a posléze z kapalného na plynné. Dalším přísunem energie dochází u plynů k jejich disociaci a následně k jejich ionizaci. Tento proces uvolňuje elektrony z valenčních orbitů atomů. Uvolněné elektrony mají záporný náboj a vedou elektrický proud, ionizovaná jádra atomů mají kladný náboj. Ionizovaný plyn (plazma) je tedy elektricky vodivý, ale chová se elektricky neutrálně. Pro svařování a řezání materiálů se plazma využívá jako média pro přenos tepelné energie v koncentrované formě. Plazmový oblouk může dosahovat teploty až **30 000°C**. Konkrétní hodnota je závislá na vlastnostech příslušného plynu (případně směsi plynů). Především závisí na tepelné vodivosti, tepelné kapacitě a ionizační energii potřebné k tepelné disociaci molekul. Díky vysoké teplotě plazma expanduje a proudí nadzvukovou rychlostí ve směru k anodě (řezanému materiálu). Úplná ionizace plynu však probíhá až při teplotě **100 000 K**, proto je plazma při řezání jen částečně ionizována. Zbýlý neionizovaný plyn vytváří chladnější vrstvu a ta stabilizuje plazmový paprsek v ose hořáku tak, aby se plazma nedotýkala stěn trysky. Interakcí plazmového proudu s řezaným materiálem dochází k jeho natavení a následnému procesu tepelného dělení.

Plazma se s výhodou využívá pro řezání kovových materiálů, a to jak uhlíkových ocelí, tak korozi-vzdorných a barevných kovů. Pro dělení materiálů pomocí plazmy se používá

zkratka **PAC (Plasma Arc Cutting)**. Technologie využívá vysoké teploty a výstupní rychlosti plazmového paprsku. Při zvýšení průtoku a tlaku plazmového plynu se zvýší dynamický účinek vystupující plazmy a dochází k vyfukování nataveného materiálu z řezné spáry. Výstupní rychlosti plazmy dosahují **1500 až 2300 m·s⁻¹**.

Rychlost řezání je závislá na typu zdroje, řezaném materiálu a plazmovém plynu. Rychlost řezání uhlíkových ocelí lze zvýšit při použití kyslíku jako plazmového plynu. Směsi argonu a vodíku se používá jako plazmový plyn pro řezání především vysokolegovaných ocelí, niklu, molybdenu, mědi a dalších kovů. Kombinací argonu a vodíku (od 5 do 35 % - směsi Hytec) lze dosáhnout optimálních výsledků s ohledem na teplotu plazmatu, řeznou rychlost a kvalitu řezné plochy u většiny kovů. Někdy se místo vodíku používá dusík nebo může být použita tříložková směs.



Obr. 4.9. Princip plazmového řezání

Základní druhy plazmových zařízení:

Vzduchová plazma – uvedena na trh počátkem 60. let minulého století. Její hlavní nevýhodou, která přetrvává dodnes, je rychlé poškození dílů vystavených oxidaci (především elektrod). Vzduchové plazmy jsou rozšířeny a používají se pro dělení především uhlíkových ocelí do tloušťky cca 40 mm. Stlačený vzduch (**0,4 až 0,8 MPa**, průtok **až 130 l/min**) se používá také ke stabilizaci plazmy. Využívá se zirkoniová nebo hafniová elektroda. Oxidy a nitridy těchto materiálů mají vysoké teploty tavení (**2500°C až 3300°C**)

Vodou stíněná plazma – kolem plazmového paprsku se vstříkuje voda, která ochlazuje vnější vrstvy plazmy a koncentruje průchod energie do osy plazmového oblouku. Toto řešení se používá především pro proudovou hustotu vyšší než 100 A v podobě tzv. vodních stolů. V takovém uspořádání se sníží úroveň hluku a záření. Mezi nevýhody patří až o zhruba 20% snížená řezná rychlost a špatná kontrola procesu řezání ze strany operátora.

Plazmy s vysokou koncentrací paprsku (High Definition, Fine Focus) – jsou v současné době poslední modifikací plazmových hořáků. Fokusace plazmového paprsku je provedena pomocí sekundárního plynu (vzduch, dusík, kyslík či metan). Vycházející plazmový paprsek má až trojnásobné zvýšení hustoty energie při současném zvýšení teploty a výstupní rychlosti. Výsledkem je zúžení řezné spáry na polovinu a zvýšení řezné rychlosti. Pro tloušťky do 10 mm jsou řezy HD plazmou téměř kolmé (odchylka 1°-2°), velmi hladké a bez otřepů. Aplikací sekundárního plynu také vzrůstá životnost spotřebních dílů [27, 29].

V závislosti na druhu plazmy, její aplikaci a konstrukci jsou **výkonové hustoty** v intervalu 10^6 až $10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Výhody:

- téměř bez alternativy při řezání vysokolegovaných ocelí a slitin hliníku ve střední a větší tloušťce,
- velký výkon při řezání do tloušťky 30 mm,
- řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem,
- vysoká řezná rychlost (až 10x vyšší než při autogenním řezání),
- v případě použití plazmy s vysokou hustotou energie je kvalita řezu srovnatelná s laserem,
- možnost řezání plazmou pod vodou pro velmi malé tepelné ovlivnění řezaného materiálu a malou hladinu hluku v okolí pracoviště,
- snadná automatizace,
- nižší pořizovací i provozní náklady v porovnání s laserem.

Nevýhody:

- tvorba otřepu z roztaveného kovu na spodní straně,
- větší tepelně ovlivněné pásmo než u laseru.

4.3. Obecné porovnání nekonvenčních metod

Jednoznačně lze prohlásit, že **pro dělení plechů v hromadné výrobě** je nejvhodnější způsobem **technologie stříhání**. Zde je tato technologie omezena především pevností, tvrdostí a tloušťkou stříhaného plechu, kde se zvyšující se pevností a tloušťkou rostou náklady na nástroje i stroje a technologie se tak postupně stává nerentabilní. Stříhání má svoji nespornou přednost ve vysoké produktivitě, protože celé střížná plocha příslušného tvaru vznikne na jeden zdvih nástroje. Pro stříhání složitých tvarů se předpokládá hromadná nebo velkosériová výroba, neboť výroba nástroje je velmi nákladná. Následné plastické vlastnosti plechu děleného touto technologií ovlivňuje zejména střížná mezera, která má vliv na velikost vzniklého otřepu a pásma utržení, především u hlubokotažných plechů. Případný otřep je iniciátorem trhlin a výrazně se tak snižuje tvařitelnost. Pokud se snažíme vznik otřepu eliminovat zmenšením střížné mezery, je zde riziko v příliš vysokém deformačním zpevnění okolí stříhu, což zejména u vysokopevnostních plechů vede také ke snížení tvařitelnosti. Velikost střížné mezery je tak kompromisem mezi deformačním zpevněním okolí stříhu a vznikem otřepu s přihlédnutím k materiálovým vlastnostem stříhaného plechu. Je tedy zřejmé, že **maximálních plastických vlastností je dosaženo u každého materiálu při různých hodnotách střížné mezery**.

Nekonvenční technologie dělení plechů se uplatňují při dělení plechů s vyšší pevností a větších tloušťek, kde by dělení technologií stříhání nebylo již ekonomicky únosné. Tyto technologie se používají jak v pedsériové (tzv. prototypové výrobě), tak i ve výrobě hromadné. Mezi tyto technologie patří dělení vodním paprskem, laserem a plazmou. **Vodní paprsek** sice umožňuje řez bez deformačního a tepelného ovlivnění, nicméně pro přípravu přístřihů v automobilovém průmyslu se nepoužívá. To je dáno zejména nutností znovu jímat řezací médium (vodu včetně abraziva) a chránit plech proti korozi. Další skutečnost, která hovoří v neprospěch této technologie, je horší automatizace v prostoru, čímž se značně snižují výrobní možnosti. V praxi se nejčastěji používá **plazma** a **laser**. U těchto tzv. „teplých“ technologií, které koncentrují teplo do velmi úzké oblasti, jsou pro následné plastické vlastnosti rozhodující výsledné vlastnosti právě této oblasti. Při dělení UHSS materiálů, které mají ve struktuře martenzit, může dojít k vyžihání řezné hrany nebo naopak k dosažení výrazně vyšší rychlosti ochlazování, což vede ke vzniku ještě tvrdší struktury, než je tvrdost původního materiálu. Tato struktura samozřejmě negativně ovlivňuje následné plastické vlastnosti.

Lze říci, že kvalita řezné hrany, přesnost, šířka řezu i velikost tepelně ovlivněné zóny mluví ve prospěch **laseru**. Výhodou rovněž je, že stejně jako u vodního paprsku není tato

technologie omezena elektrickou vodivostí materiálu. Řezná hrana je čistá, bez otřepu z roztaveného kovu na spodní straně s velmi úzkou tepelně ovlivněnou zónou (díky vysoké hustotě energie).

Plazma je charakteristická relativně velkým množstvím tepla vneseného do děleného materiálu. Tato technologie je zároveň nejvíce náchylná na nastavené parametry řezání. Kvalitou řezné plochy se pohybuje od dělení kyslíko – acetylenovým plamenem až takřka po dělení laserem. Při špatném nastavení parametrů řezání vzniká výrazný otřep (přetok) z roztaveného materiálu, který jednak snižuje následné plastické vlastnosti a zároveň překáží při dalším zpracování přístřihu a musí se proto pracně odstraňovat. Lze říci, že technologie řezání plazmou se pro přípravu polotovarů z plechů hodí pouze v případě, kdy je řez rovný. V takovém případě je dělení plasmou výhodné zejména pro svoji efektivitu (rychlost, cena), samozřejmě při precizním nastavení řezných parametrů.

Jednotlivé technologie dělení plechů lze významnou měrou ovlivnit jejich charakteristickými parametry (u stříhání je to velikost střížné mezery, u vodního paprsku tlak vody, abrazivo a rychlost posuvu, u „teplých“ technologií jsou to parametry paprsku, resp. oblouku, rychlost posuvu apod.). Při široké škále dělených materiálů nelze obecně doporučit konkrétní technologii. Ta by měla být volena vždy s přihlédnutím k charakteru děleného materiálu s ohledem na jeho konkrétní mechanické vlastnosti a požadované kvalitě řezné hrany.

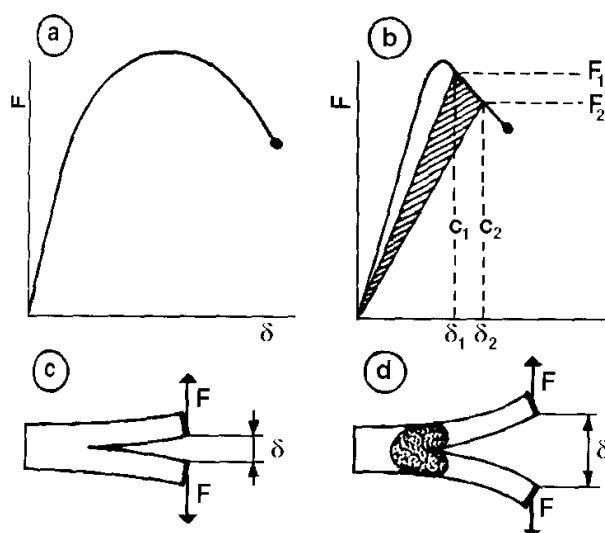
Jak již bylo řečeno, následné plastické vlastnosti přístřihů závisí především na zvolené technologii přípravy a nastavených parametrech dělení. Testované materiály Docol 1200 M a BTR 165 jsou martenzitické oceli patřící do skupiny UHSS. Lze tedy předpokládat, že významný vliv budou mít zejména „teplé“ technologie. Vzhledem k charakteru materiálů a vysoké hustotě dopadových energií (tím i vysoké rychlosti ochlazování okolí řezu) lze předpokládat mírný nárůst pevnostních charakteristik. Lze následně usuzovat i na pokles plastických vlastností oproti broušenému etalonu. Výraznější pokles plastických vlastností lze předpokládat u plazmy, kde bude jednoznačně horší kvalita řezné hrany a projeví se tak vrubový účinek. Největší pokles plastických vlastností lze předpokládat u materiálu děleného technologií stříhání (u materiálu BTR 165 až po kalení) v důsledku velkého deformačního zpevnění a porušení střížné hrany zárodečnými mikrotrhlinami. Pro hlubší pochopení řešeného tématu ve vztahu nejen k tepelně a deformačně ovlivněné oblasti v okolí střížné (řezné) hrany, ale zejména na její kvalitu (vznik vrubů v důsledku předchozího způsobu dělení) je zařazena následující kapitola.

5. ZÁKLADY LOMOVÉ MECHANIKY KOVŮ

Z inženýrského hlediska je houževnatost významnou vlastností konstrukčních materiálů, kterou lze obecně definovat jako schopnost materiálu absorbovat energii před porušením. Proto lomy podle **energetické** náročnosti dělíme na lomy **houževnaté** a **křehké** a podle vzhledu lomové plochy dále na **tvárné** a **štěpné**. Oba testované materiály patří do skupiny martenzitických ocelí, proto lze vzhledem k vysoké pevnosti a tvrdosti předpokládat i křehké porušení.

Lom je nehomogenní proces deformace materiálu doprovázený tvorbou nových povrchů ve struktuře, jehož důsledkem je ztráta základní funkce materiálu - přenosu napětí. Finálnímu lomu tělesa obvykle předchází šíření trhliny (magistrální trhliny), které se může realizovat v zásadě dvojím způsobem. **Stabilní šíření trhliny** nastává v tom případě, kdy na vytvoření nové plochy trhliny je nutné dodat jisté množství deformační energie, naopak **nestabilní šíření trhliny** vzniká v okamžiku, kdy žádná dodatečná energie na další šíření trhliny není nutná.

Při zatěžování trhliny silou F , která je kolmá k lomovým plochám, dochází nejprve k **rozevření trhliny** až do jisté kritické hodnoty δ_c a následně k jejímu šíření (obr. 5.1.). V případě stabilního šíření trhliny aplikovaná síla dále vzrůstá až do jistého maxima, kdy se stabilní šíření mění na lomovou nestabilitu.



Obr. 5.1. Závislost síly na rozevření trhliny při stabilním (a) a nestabilním (b) šíření trhliny, elastickém namáhání trhliny (c) a elasticko - plastickém namáhání trhliny (d)

V případě nestabilního šíření dochází okamžitě po dosažení kritické hodnoty rozevření δ_c k poklesu působící síly. Energie na vytvoření jednotkové plochy trhliny při jejím zvětšení z délky c_1 na c_2 , které je ekvivalentní změně rozevření trhliny z $\delta(c_1)$ na $\delta(c_2)$ - někdy také nazývaná **hnací síla trhliny**, je dána vyznačeným trojúhelníkem pod křivkou závislosti síly F na rozevření δ a má následující tvar:

$$G_c = \frac{1}{t(c_2 - c_1)} \left[\frac{1}{2} F_1 \delta_1 + F_1 (\delta_2 - \delta_1) - \frac{1}{2} (F_1 - F_2) (\delta_2 - \delta_1) \right] \quad (1)$$

t - tloušťka tělesa

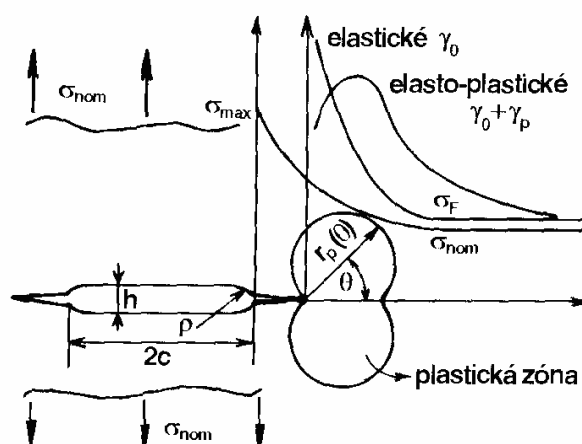
K iniciaci a šíření trhlín, které vedou k finálnímu lomu tělesa, dochází především v oblastech koncentrátorů napětí, jakými jsou vruby, apriorní trhliny, strukturní nehomogenity nebo jiné defekty materiálu. V nejjednodušším případě defektu eliptického tvaru v tělese zatíženém napětím σ_{nom} v oblasti elastických deformací (obr. 5.2.) je maximální napětí na čele tohoto defektu dáno následujícím vztahem:

$$\sigma_{max} = \alpha \sigma_{nom} = \sigma_{nom} \left(1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} \right) \quad (2)$$

c - poloviční velikost eliptického defektu

ρ - ostrost defektu daná poloměrem zaoblení

α - koeficient koncentrace napětí



Obr. 5.2. Elastické a elasticko – plastické rozdělení napětí na čele defektu eliptického tvaru před šířením a v okamžiku počátku šíření trhliny

V blízkosti kruhových defektů v materiálu zatíženém napětím v oblasti elastických deformací je proto maximální napětí σ_{\max} z rovnice (2) pro $c = \rho$ rovno trojnásobku nominálního napětí $3\sigma_{\text{nom}}$.

Při elastickém namáhání ostré trhliny napětím, které je k rovině trhliny kolmé, dochází v blízkosti čela trhliny k jeho přerozdělení a pole napětí má v zóně okolí čela trhliny následující tvar:

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (3)$$

kde r a θ jsou souřadnice polárního systému s počátkem v kořeni trhliny, $f_{ij}(\theta)$ je bezrozměrná funkce úhlu θ a K_I je faktor intenzity napětí definovaný vztahem:

$$K_I = f\sigma\sqrt{\pi c} \quad (4)$$

c - poloviční velikost trhliny

f - parametr (závisí na tvaru vzorku a orientaci trhliny)

V okamžiku nestabilního šíření trhliny dosahuje hodnota faktoru intenzity napětí kritické hodnoty lomové houževnatosti, která má pro první tahový mód namáhání trhliny (obr. 5.3.) tvar:

$$K_{IC} = f\sigma\sqrt{\pi c_k} \cong \sqrt{G_{IC}E'} \quad (5)$$

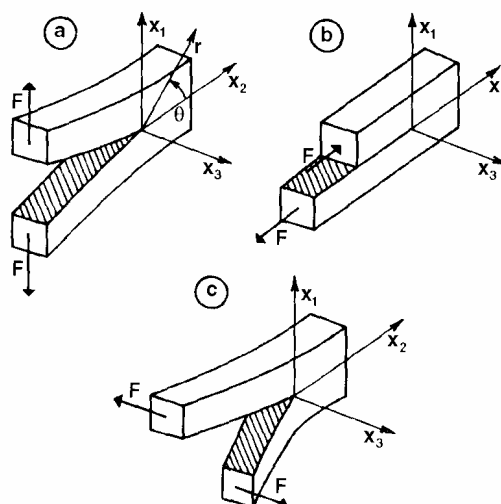
$E' = E$ - platí pro stav rovinné napjatosti

$E' = E/(1-\nu)$ - platí pro stav rovinné deformace

ν - parametr napjatosti

c_k - polovina kritické velikosti vady pro danou hodnotu působícího napětí σ

G_{IC} - energie na vytvoření jednotkové plochy trhliny



Obr. 5.3. Základní módy namáhání trhliny:

tah (a), smyk (b), stříh (c)

Ve stavu rovinné napjatosti, kdy nejsou zachovány podmínky prvního módu namáhání trhliny, se kritická hodnota faktoru intenzity napětí označuje K_C a hnací síla trhliny G_c . Podobně lze toto kritérium nestabilního šíření trhliny formulovat i pro kritickou hodnotu napětí, lomové napětí σ_F a trhlínu dané velikostí c . Podle Griffithova kritéria nestabilního šíření trhliny je lomové napětí:

$$\sigma_F = \left(\frac{2E\gamma_0}{\pi c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

γ_0 - je skutečná povrchová energie

Porovnáním rovnice (5) s rovnicí (6) je:

$$G_{IC} = 2\gamma_0 \quad (7)$$

Protože na čele trhliny se při dostatečně vysoké hodnotě působícího nominálního napětí σ formuje, vyjma lineárně elastických materiálů, plastická zóna (obr. 5.2.), má ve skutečnosti pole napětí na čele trhliny uvedené v rovnici (3) omezenou platnost, a to jen pro vzdálenost r od čela trhliny větší než je velikost plastické zóny r_p . První odhad této velikosti vyplývá z rovnice (3) pro $\sigma_F = \sigma_y$ (lomové napětí rovno napětí na mezi kluzu) a z předpokladu, že oblast relaxace lokálního napětí plastickou deformací před čelem trhliny je rovna polovina velikostí plastické zóny:

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \cong c \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^2 \quad (8)$$

Energie na vytvoření jednotkové plochy trhliny v okamžiku jejího nestabilního šíření je proto funkcí meze kluzu:

$$G_{IC} = 2\sigma_y \delta_c \quad (9)$$

a lomová houževnatost má potom užitím rovnice 5 následující tvar:

$$K_{IC} = \sqrt{2E'\sigma_y \delta_c} \quad (10)$$

Přesnější odhad velikostí plastické zóny navrhl Dugdale ve tvaru:

$$r_p = c \left[1 - \cos \left(\frac{\pi \sigma}{2\sigma_y} \right) \right] \text{ a pro } \sigma \ll \sigma_y, \quad r_p = \frac{\pi^2 c}{8} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^2 \quad (11)$$

Rozevření trhliny $\delta(c)$ je jako funkce působícího napětí a napětově deformačních charakteristik materiálu. Podle tohoto řešení je:

$$\delta(c) = \frac{8\sigma_y c}{\pi E} \ln \left(\sec \frac{\pi \sigma}{2\sigma_y} \right) \text{ a pro } \sigma \ll \sigma_y, \quad \delta(c) = \frac{8\sigma_y r_p}{\pi E} \quad (12)$$

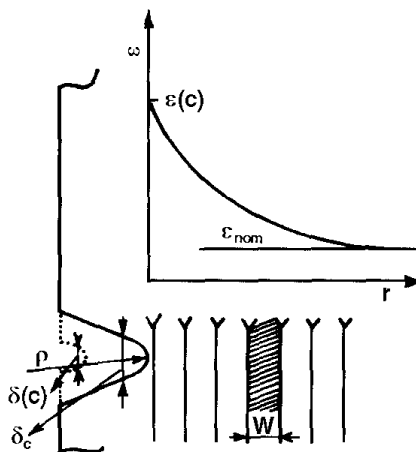
Existence plastické zóny na čele šířící se trhliny má svůj důsledek ve zvýšení hodnoty hnací síly trhliny z $2\gamma_0$ (rov. 7) až o tři řády a $G_{Ic} = 2(\gamma_0 + \gamma_p)$, kde γ_p je plastická práce.

Koncentraci napětí na čele trhliny odpovídá i lokalizovaný vzrůst deformace, kterou toto napětí vyvolává (obr. 5.4.). Při aproximaci lokální zóny na čele trhliny o ostroty ρ elementem o šířce w , ve kterém je deformace homogenní, je rozevření trhliny $\delta(c)$ a kritické rozevření trhliny δ_c za podmínek rovinné deformace dáno vztahem:

$$\delta(c) = 2\rho \varepsilon(c) \text{ a } \delta_c = 2\rho \varepsilon_f(c), \quad (13)$$

kde lomová deformace $\varepsilon_f(c)$ odpovídá maximální hodnotě deformace před čelem trhliny v okamžiku iniciace jejího šíření a kterou lze jednoduše odhadnout lomovou deformací při tahové zkoušce ε_f . Za podmínek rovinné napjatosti lze rozevření trhliny aproximovat dostatečně přesně rovnicí (12) jen když je plastická zóna na čele trhliny r_p větší než asi čtyřnásobek tloušťky tělesa t . Kritické rozevření trhliny je potom v tomto případě:

$$\delta_c = t\varepsilon_f(c) \quad (14)$$

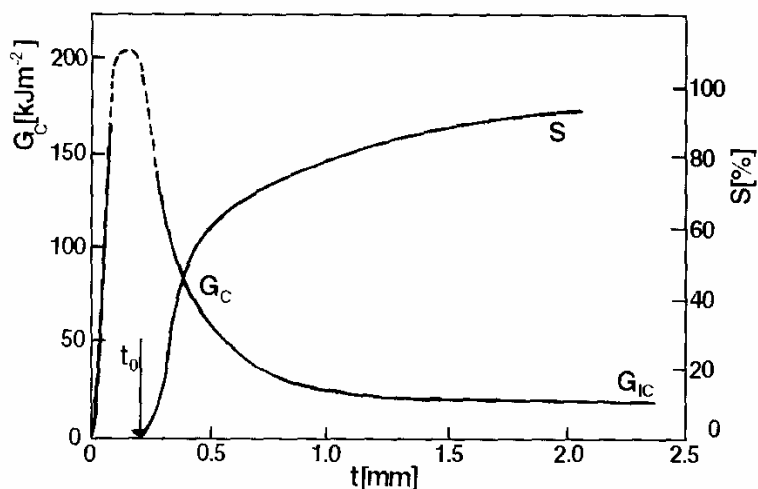


Obr. 5.4. Rozdělení deformace před koncentrátorem napětí

Při namáhání trhliny smykem druhým módem (obr. 5.3.), se trhlina šíří ve směru odchýleném přibližně o 45° od směru namáhání a hnací síla trhliny $G_{c(45^\circ)}$ má hodnotu energie spotřebované na tvorbu jednotkové plochy trhliny při jejím šíření za podmínek rovinné napjatosti. To je však možné jen u velmi tenkých těles, jejichž tloušťka $t \sim t_0$. U těles s větší tloušťkou je hnací síla trhliny vždy výsledkem šíření trhliny za podmínek rovinné napjatosti, která se realizuje v blízkosti povrchu tělesa a při stavu rovinné deformace, který vzniká v jeho středové části. Jen při velmi silných tělesech je smyková složka působícího napětí při povrchu zanedbatelná a trhlina se v takových případech šíří pod vlivem čisté rovinné deformace a hnací síla trhliny má hodnotu označovanou jako G_{lc} (obr. 5.5.). Ze znalosti podílu šíření trhliny za podmínek rovinné deformace na lomové ploše S lze hnací sílu trhliny pro tloušťku tělesa $t \sim t_0$ stanovit ze vztahu:

$$G_c = SG_{lc} + (1 - S)G_{c(45^\circ)} \quad (15)$$

$G_{c(45^\circ)}$ je přibližně podle rovnice (14): $G_{c(45^\circ)} = \sigma_y \varepsilon_f t$



Obr. 5.5. Závislost hnací síly trhliny a podílu křehkého lomu za podmínek rovinné deformace na lomové ploše S vůči tloušťce tělesa

Při stříhovém, třetím módu namáhání trhliny (obr. 5.3.) lze velikost plastické zóny na čele trhliny odhadnout z podobného vztahu, jaký je uveden v rovnici (8):

$$r_p = c \left(\frac{\tau}{\tau_y} \right)^2 \quad (16)$$

τ - smykové napětí.

τ_y - mez kluzu ve smyku

Hnací síla při třetím (stříhovém) módu je:

$$G_{IIIc} = \frac{K_{IIIc}^2}{G} = \frac{\pi c \tau_F^2}{G} \quad (17)$$

G - modul pružnosti ve smyku

K_{IIIc} - houževnatost materiálu při stříhovém namáhání trhliny

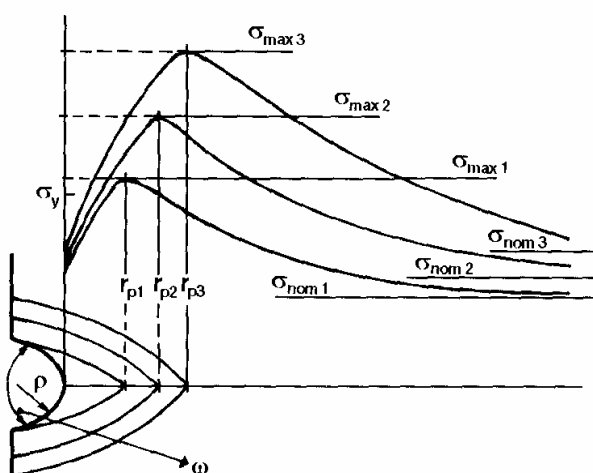
τ_F - lomové napětí ve smyku

Při vysoké schopnosti plastické deformace materiálu nebo při dostatečně vysoké hodnotě aplikovaného napětí se na čele trhliny utváří rozsáhlá plastická zóna, uvnitř které má koeficient koncentrace napětí vzhledem k mezi kluzu tvar:

$$\alpha = \frac{\sigma}{\sigma_y} = \left[1 + \ln \left(1 + \frac{r}{\rho} \right) \right] \quad (18)$$

Maximální hodnota koeficientu koncentrace napětí α_{\max} vyplývá okamžitě z rovnice (18) pro $r = r_p$ a nezávisí na ostrosti defektu, ve kterém se magistralní trhlina iniciovala, ale jen na úhlu mezi jeho stěnami ω (obr. 5.6.):

$$\alpha_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_y} = \left(1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\omega}{2} \right) \quad (19)$$



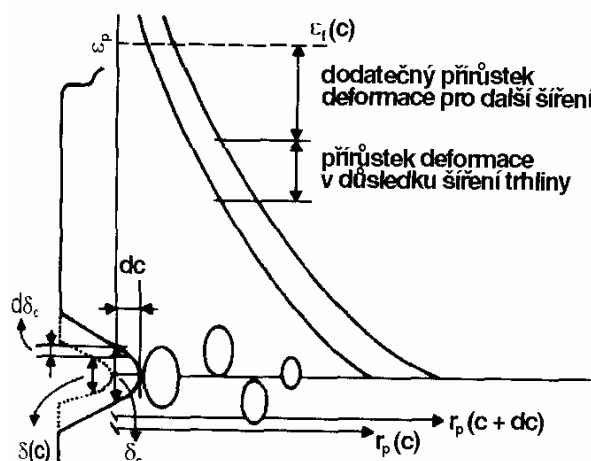
Obr. 5.6. Poloha elasticko – plastického rozhraní při růstu nominálního napětí σ_{nom} před vrubem

Defekty, většinou dutiny, které vznikají v oblasti plastické zóny jako důsledek nehomogenní plastické deformace, se nemohou šířit nestabilně, ale jejich šíření je podmíněno spojitým dodáváním deformační energie během celého lomového procesu. Zvyšování aplikovaného napětí, a tedy spojitě dodáváním deformační energie, vede k růstu rozevření trhliny $\delta(c)$ (obr. 5.7.). Při elementárním přírůstku velikostí trhliny během jejího stabilního šíření dojde v důsledku posunu lomové fronty i ke zvýšení napětí a tím i deformace před jejím čelem. Další elementární přírůstek délky trhliny při jejím stabilním šíření je podmíněn dodatečným přírůstkem aplikovaného napětí a tím i deformace tak, aby v těsné blízkosti čela magistralní trhliny bylo dosaženo lomové deformace $\epsilon_f(c)$. Tento stabilní růst trhliny se projevuje v nelineární zátěžné charakteristice, závislosti síly F na rozevření trhliny (δ) je dána J – integrálem:

$$J = \int_0^{\delta_c} \sigma(\delta) d\delta \quad (20)$$

Při lineárně elastickém namáhání trhliny je kritická hodnota **J** - integrálu,

$$J_{IC} = G_{IC} = (1 - \nu^2) \frac{K_{IC}^2}{E} \quad (21)$$



Obr. 5.7. Změna rozložení deformace na čele trhliny při jejím stabilním šíření

Při vysokých hodnotách aplikovaného napětí dochází za předpokladu vysoké schopnosti plastické deformace materiálu ke zplastizování celého průřezu tělesa pod koncentrátorem napětí. Tento stav se označuje jako **general yield** (úplná plastická deformace průřezu) a napětí, při kterém tento stav vzniká, je σ_{GY} . Podílem tohoto napětí a meze kluzu σ_y je definován **constrain factor** (faktor mechanického sevření), $L = \sigma_{GY} / \sigma_y$ jako míra středního napětí v průřezu tělesa v okamžiku zplastizování jeho průřezu. Rozevření trhliny je v důsledku vysoké plasticity ve srovnání se stavem rovinné deformace (13) asi dvojnásobné:

$$\delta(c) = 4\rho\varepsilon(c) \quad (22)$$

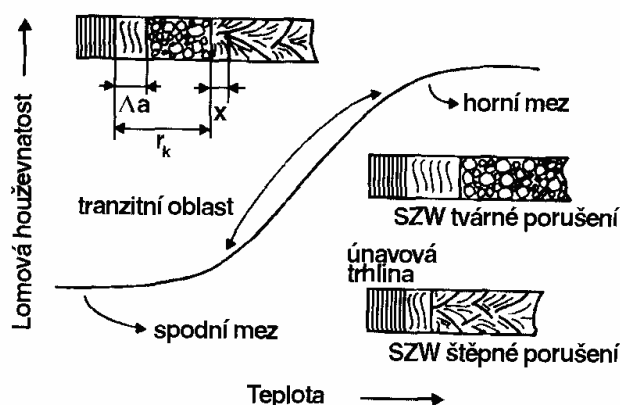
Faktorem, který výrazně ovlivňuje lomové chování materiálu, je teplota. S rostoucí teplotou dochází k poklesu meze kluzu a tak při stejné hodnotě působícího napětí je plastická zóna na čele trhliny větší a v důsledku toho hnací síla trhliny a tím i lomová houževnatost vzrůstá. Dalším, neméně významným důvodem růstu lomové houževnatosti s rostoucí teplotou je postupná změna mikromechanismu iniciace a šíření lomového porušení v samotné struktuře materiálu. U materiálů s vysokou schopností plastické deformace, jakými jsou kovy s **fcc** mřížkou, zůstává mikromechanismus iniciace lomového porušení v široké oblasti teplot prakticky stejný, avšak u kovu s **bcc** mřížkou nebo u polymerů dochází v poměrně nízkém teplotním intervalu ke změně mikromechanismu iniciace lomu a lomová houževnatost ze spodní meze vzrůstá k horní mezi a mechanismus šíření magistrální trhliny se mění ze štěpení na tvárné porušení (obr.5.8.). S rostoucí teplotou se zároveň rozšiřuje zóna intenzivní plastické deformace, stretched zone width (**SZW**). V tranzitní teplotní oblasti je lomová plocha tvořena tvárným lomem, který je v místě konverze r_k vystřídán nízkoenergetickým porušením.

Lokalizované smykové napětí má v tomto případě tvar:

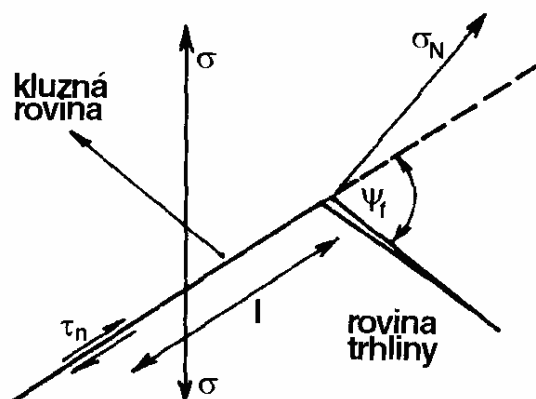
$$\tau_f = \left[\frac{12\gamma_{ef}G}{\pi(1-\nu)l} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

γ_{ef} - efektivní povrchová energie

l - délka nakupení dislokací

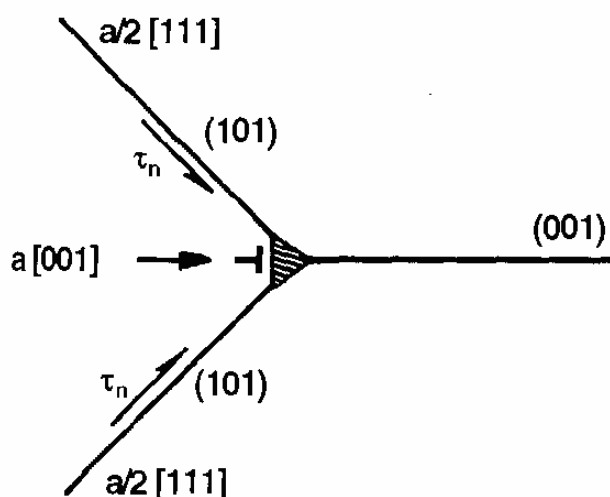


Obr. 5.8. Závislost lomové houževnatosti definované podílem $\sqrt{E'G_c}$ na teplotě a změna kontrolující mechanismus šíření magistrální trhliny



Obr. 5.9. Schéma Strohova mikromechanismu iniciace trhliny

Cottrell navrhl jiný, oproti Strohově modelu méně energeticky náročný, model v kovech s **bcc** mřížkou, založený na interakci dvou dislokací v tzv. štěpnou dislokaci (obr. 5.10.).

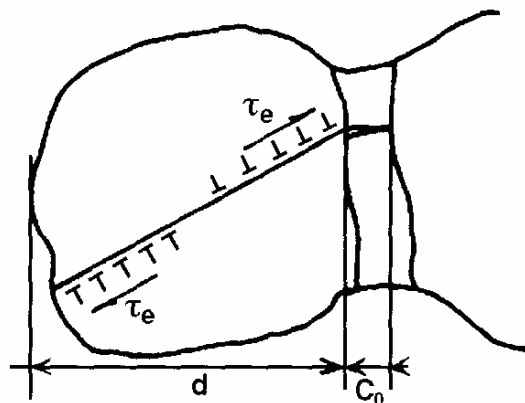


Obr. 5.10. Schéma Cottrellova mikromechanismu iniciace trhliny

Opakování tohoto procesu vede k nukleaci mikrotrhliny a v okamžiku, kdy napětí překročí lokální štěpnou pevnost danou vztahem:

$$\sigma_f = \frac{2\gamma_{ef}G}{k_y^s} d^{-\frac{1}{2}} \quad (24)$$

dojde k jejímu šíření. Na koncepci blokády dislokací ve skluzovém pásu karbidy během plastické deformace je založen Smithův model iniciace štěpení ocelí s převážně feritickou strukturou (obr. 5.11.).



Obr. 5.11. Schéma Smithova mikromechanismu iniciace trhliny

Podmínka pro šíření mikrotrhliny vzniklé nakupením dislokací na karbidické částici deskovitého tvaru o tloušťce C_0 je podle tohoto modelu:

$$\left(\frac{C_0}{d}\right)\sigma_f^2 + \tau_e^2 \left[1 + \frac{4}{\pi} \left(\frac{C_0}{d}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{\tau_0}{\tau_e}\right] \geq \frac{4E\gamma_{ef}}{\pi(1-\nu^2)d} \quad (25)$$

τ_e - efektivní smykové napětí ve skluzové rovině

τ_0 - Peierls-Nabarrovo napětí ve smyku

Při zanedbání druhého členu levé strany této rovnice má potom lokální štěpná pevnost tvar:

$$\sigma_f = \left[\frac{4E\gamma_{ef}}{\pi(1-\nu^2)C_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

V případě, že mají karbidy kulovitý tvar, jako tomu je u ocelí se sféroidizovanou strukturou, mění se v důsledku změny tvaru mikrotrhliny kritérium iniciace štěpení v:

$$\sigma_f = \left[\frac{4E\gamma_{ef}}{\pi(1-\nu^2)d_p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

d_p - velikost karbidické částice

Rychlost šíření trhliny při nízkoenergetickém štěpném porušení v_c závisí především na plastické práci γ_p nutné na formování jednotkové plochy lomového povrchu, která je rostoucí funkcí teploty a hustoty aktivních Frank-Readových zdrojů mobilních dislokací N_0 . Podíl plastické práce γ_p a skutečné povrchové energie γ_0 je v tomto případě,

$$\frac{\gamma_p}{\gamma_0} = konst N_0^{\frac{3}{2}} \left(\frac{v_0}{v_c} \right)^2 T^{\frac{5}{2}} \quad (28)$$

v_0 - rychlost zvuku

Charakteristickým rysem lomové plochy při nízkoenergetickém štěpném porušení jsou štěpné fasety. Vysokoenergetické, tvárné lomové porušení kovových materiálů se v převážné míře realizuje mechanismem růstu a koalescence dutin nukleovaných na částicích sekundární fáze. Energetické kritérium rovnosti povrchové energie nově formovaných povrchů na fázovém rozhraní částice a matrice a elastické deformační energie akumulované částicí se stalo východiskem pro odhad kritické hodnoty nukleační deformace předložený Brownem a Stobbssem:

$$\varepsilon_n = \left(\frac{8\gamma_i}{E^* d_p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

γ_i - povrchová energie fázového rozhraní

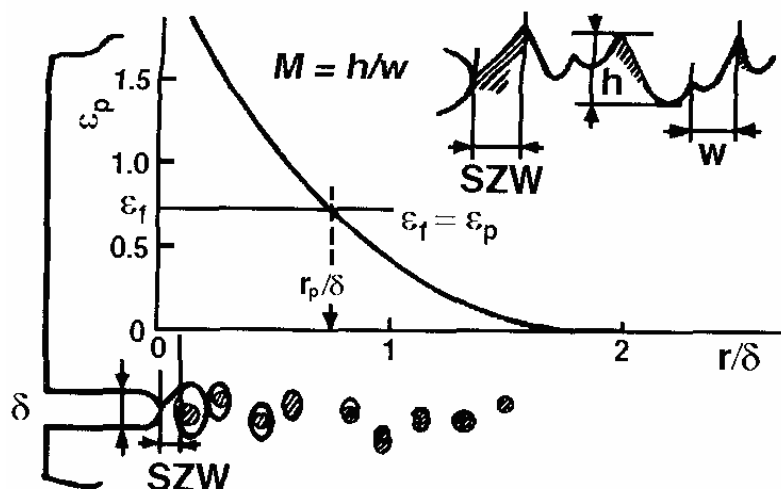
E^* - modul pružnosti částice sekundární fáze

Během procesu zatěžování nukleované dutiny rostou do tvaru elipsoidu, jehož velikost D_3 ve směru působícího napětí roste exponenciálně s rostoucím stavem napjatosti σ_m/σ_{ef} , kde σ_m je střední napětí (obr. 5.12.):

$$\frac{dD_3}{D_3} = 0,322 \exp\left(\frac{1,5\sigma_m}{\sigma_{ef}}\right) d\varepsilon_p \quad (30)$$

kde ε_p je hodnota plastické deformace. V okamžiku, kdy je vzdálenost mezi částicemi rovna střední velikosti dutiny, dochází ke koalescenci dutin a ke stabilnímu šíření magistralní

trhliny. Na lomové ploše se při vysokoenergetickém tvárném porušení vyskytují jamky. Podílem výšky h a šířky w těchto jamek je definována mikrodrsnost lomové plochy.



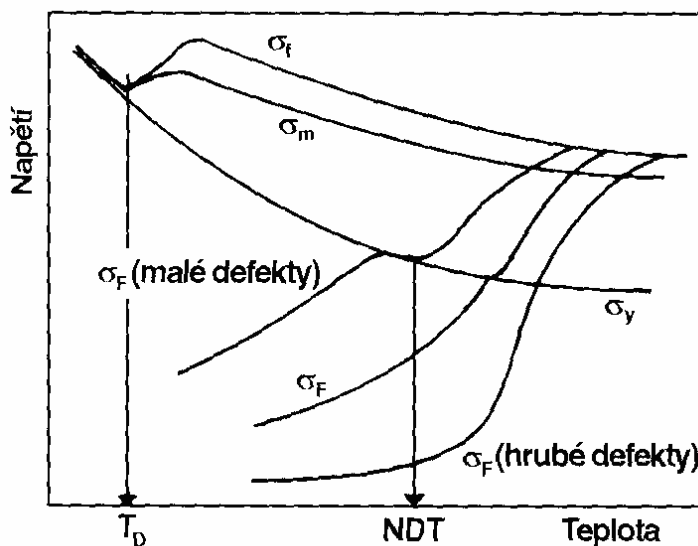
Obr. 5.12. Nukleace, růst a opalescence dutin na částicích sekundární fáze v oblasti plastické zóny před šířící se magistralní trhlinou

Změna kontrolujícího mikromechanismu iniciace a šíření lomového porušení u kovů s **bcc** mřížkou je při růstu teploty důsledkem působení dvou konkurenčních procesů. Při nízkých teplotách roste napětí na čele trhliny až do okamžiku, kdy jeho hodnota překročí lokální štěpnou pevnost, a následně se některým z uvedených mikromechanismů nebo obecně podle Griffithova kritéria (rov. 6) iniciuje mikrotrhlina. Za zvýšených teplot je generace dislokací z dislokačních zdrojů doprovázená formováním plastické zóny na čele trhliny příčinou relaxace napětí v okolí strukturních nehomogenit, jakými jsou částice sekundární fáze, na kterých pak nukleují dutiny. Z kritického počtu dislokací nakupených na překážce k_y , který je nutný pro iniciaci mikrotrhliny, lze užitím Griffithova kritéria a Hall-Petchovy rovnice, z rovnosti meze kluzu a lokální štěpné pevnosti formulovat kritérium přechodu od křehkého k tvárnému lomu ve tvaru:

$$\left(\sigma_0 d^{-\frac{1}{2}} + k_y \right) k_y = E \gamma_{ef} \quad (31)$$

Protože levá strana rov. 31 s rostoucí teplotou klesá a pravá naopak roste, je rovnice platná jen při jediné, tzv. tranzitní teplotě **TT**. Naopak, jestliže rov. 31 je platná při zadané teplotě pro jistou velikost zrna, nazývá se tato velikost tranzitní velikostí zrna d^* .

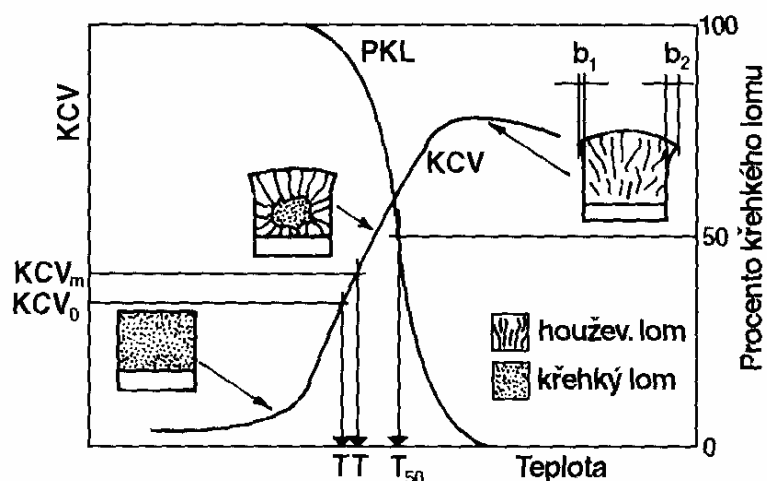
U materiálů, ve kterých jsou přítomny apriorní defekty nebo jiné typy koncentrátoru napětí, je lomové napětí σ_F do jisté hodnoty teploty, tzv. teploty nulové houževnatosti NDT, nižší než mez kluzu σ_y . Tato teplota NDT je tím vyšší, čím je defekt větší (obr. 5.13.).



Obr. 5.13. Vliv teploty na mez kluzu, mez pevnosti a lomové napětí a závislost nominálního lomového napětí σ_F materiálu s defektem na teplotě.

Nad touto teplotou, kdy dochází před vlastním šířením magistralní trhliny k rozsáhlému zplastizování průřezu tělesa, je $\sigma_F > \sigma_y$ a trhlina se šíří stabilně. Při dostatečně vysoké teplotě je plastická deformace tělesa natolik vysoká, že se existence apriorního defektu na lomovém chování materiálu neprojeví a makroskopické lomové napětí σ_F je rovno lomovému napětí tělesa bez defektu σ_t . V technické praxi se teplota nulové houževnatosti NDT zjišťuje z výsledků zkoušky třibodového ohybu plochých zkušebních těles s návarovou housenkou opatřenou vrubem. Nejvyšší teplota, při které přechází trhlina z návaru do základního materiálu, je označována jako teplota nulové houževnatosti NDT.

Nejběžnější metodou studia tranzitního chování konstrukčních materiálů je zkouška vrubové houževnatosti, při které se dynamickým třibodovým ohybem vrubovaných vzorků s V nebo U vrubem zjišťuje energie přepočtená na jednotku plochy, obvykle na 1 cm^2 , nutná k porušení vzorku. Závislost této energie, vrubové houževnatosti a procenta křehkého lomu na teplotě (obr. 5.14.) jsou podkladem pro stanovení tranzitní teploty. Tranzitní teplotu lze při zkoušce vrubové houževnatosti stanovit z dané, předem stanovené úrovně KCV_m a nebo jako teplotu, při které je na lomové ploše 50% křehkého lomu.



Obr. 5.14. Závislost vrubové houževnatosti a procenta křehkého lomu PKL na teplotě, definice tranzitní teploty TT , příčné rozšíření b_1 , b_2 a charakter lomových ploch v závislosti na teplotě.

V návaznosti na řešenou problematiku je nutno poznamenat, že karoserie automobilu je vystavena poměrně velkým teplotním výkyvům. Z hlediska tranzitního chování jsou rozhodující nízké teploty, které v reálných podmínkách provozu mohou dosahovat řádově desítky °C pod bodem mrazu. Zpracovávané materiály proto musí mít tranzitní teplotu pod spodní hranicí provozních teplot. Samonosná karoserie automobilu je tvořena především výztuhami, které jsou spojovány většinou bodovým svařováním. S ohledem na tranzitní teplotu je tedy bezpodmínečně nutné znát nejen chování samotných materiálů za nižších teplot, ale i karoserie jako celku [30, 31, 32].

6. TEPLOTNÍ DĚJE PŘI TERMICKÉM DĚLENÍ

Metody termického dělení se vyznačují **rychle se měnící teplotou v širokém intervalu**. V tomto teplotním intervalu probíhá celá řada procesů: tavení základního materiálu, metalurgické reakce s řezacím plynem a strukturní změny v tepelně ovlivněné oblasti. V důsledku přívodu tepelné energie do místa řezu vzniká v základním materiálu **teplotní pole** (32).

$$T = f(x, y, z, t) \quad (32)$$

Pokud je teplota kromě souřadnic bodu také funkcí času, vzniká nestacionární teplotní pole. Podle toho, zda je teplota funkcí jedné, dvou nebo tří souřadnic, rozlišujeme teplotní pole jedno-, dvou- a třírozměrné.

Při řešení procesu šíření tepla v okolí řezu a určení charakteru teplotního pole se vychází ze základní diferenciální Fourierovy rovnice šíření tepla vedením (33). V tomto případě není uvažován výkon vnitřních zdrojů.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T \quad (33)$$

λ - součinitel tepelné vodivosti

c – měrná tepelná kapacita

ρ - měrná hmotnost

Fourierova diferenciální rovnice je odvozena na základě zákona o zachování energie.

Teplo se šíří v prostoru z těles teplejších na tělesa chladnější, a to třemi základními způsoby:

- Vedením tepla - kondukcí, tedy bezprostředním stykem teplejších hmotných částic se studenějšími.
- Prouděním - konvekcí, která probíhá pouze v tekutinách (kapalinách nebo plynech). Při tomto jevu se teplo přenáší pohybem ohřátých částic.
- Sáláním - radiací (tepelným zářením). Intenzita záření závisí na teplotě tělesa a při dopadu na jiné těleso se vlny mění v teplo.

Přenos tepla v praxi je obvykle kombinací těchto způsobů.

6.1. Definice a popis tvaru tepelného zdroje

Pro popis děje, který probíhá při termickém dělení z hlediska rozložení teplot je třeba matematicky popsat zdroj tepla (vytvořit model zdroje). Jeho popis vychází z dané technologie dělení a z požadavků na přesnost modelu. Teplota $T(x,y,z,t)$ je funkce souřadnic v prostoru a čase. Přesné určení teplotního pole během dělení (tzn. především tvaru a rozměru natavené, případně tepelně ovlivněné oblasti) je základním úkolem veškerých simulačních výpočtů.

Tepelné zdroje můžeme rozdělit na:

- jednorozměrné,
- dvojrozměrné,
- trojrozměrné.

Při popisu šíření tepla ve vzdálenějších oblastech od zdroje tepla lze pro praktické účely podle charakteristických rozměrů řezané součásti a technologie rozlišovat několik základních druhů tepelných zdrojů. Výběr jednotlivého modelu závisí na použité technologii dělení. Základní teplotní modely jsou:

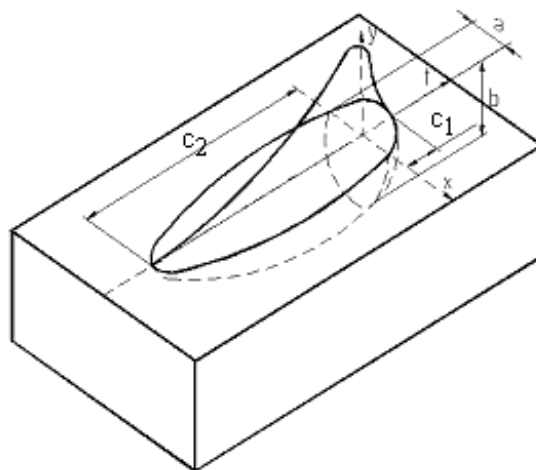
- a) Bodový zdroj – pro případy navařování na povrch tlustostěnných součástí.
- b) Lineární zdroj – pro případ svařování tenkostěnných desek, u kterých lze zanedbat teplotní gradient ve směru jejich tloušťky.
- c) Rovinný zdroj – pro použití při stykovém svařování tyčí.
- d) Zdroj s Gaussovým rozložením tepla – vychází z bodového zdroje, je využíván především pro povrchové kalení.
- e) Polokulový zdroj – vychází také z bodového zdroje, pro obloukové svařování vykazuje lepší shodu s realitou než Gaussovo rozložení.
- f) Elipsoidní zdroj – vychází z polokulového zdroje, přičemž vykazuje lepší shodu s realitou.
- g) Dvouelipsoidní zdroj – ve své modifikované podobě vykazuje nejlepší shodu s realitou pro většinu metod obloukového svařování.
- h) Prostorový zdroj s Gaussovým rozložením tepla tzv. 3D Gaussian – nejnovější tepelný zdroj pro simulaci svařování laserem a elektronovým paprskem.

6.1.1. Teplotní pole od dvouelipsoidního zdroje tepla

Dvouelipsoidní zdroj tepla je kombinací dvou do sebe zasazených elipsoidů. Zatím nejlépe popisuje reálný stav pro většinu konvenčních způsobů tavného svařování a může se z něho vycházet i při tvorbě modelů tepelného dělení. Na rozdíl od předchozích zdrojů tepla je dvouelipsoidní zdroj popisován dvěma rovnicemi jednotlivě pro každý elipsoid. Oproti elipsoidnímu zdroji se v následujících rovnicích objevují parametry f_1 a f_2 , což jsou konstanty ovlivňující rozložení intenzity toku energie do materiálu (do jednotlivých elipsoidů). Přitom musí pro konstanty platit rovnice (34).

$$f_1 + f_2 = 2 \quad (34)$$

Dvouelipsoidní zdroj je zobrazen na obr. 6.1. a je popsán následujícími rovnicemi (35) a (36).



Obr. 6.1. Model dvouelipsoidního zdroje tepla

$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_1 \cdot Q}{a \cdot b \cdot c \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{c^2}} \quad (35)$$

$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_2 \cdot Q}{a \cdot b \cdot d \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{d^2}}, \quad (36)$$

kde poloha zdroje ξ je dána rovnicí (37)

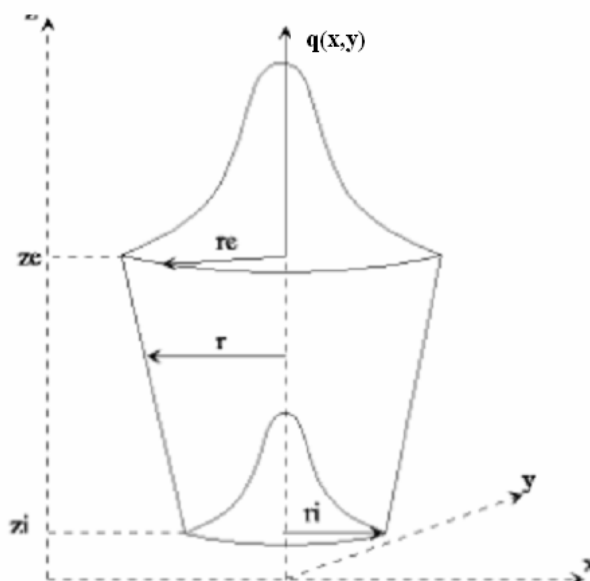
$$\xi = z_k - v(\tau - t) \quad (37)$$

$q(x,y,\xi)$	- hustota tepelného toku do materiálu	[W · m ⁻³]
Q	- celkový výkon zdroje	[W]
a,b,c	- parametry natavené oblasti	[m]
ξ	- poloha zdroje v závislosti na době svařování	[m]
x,y,z	- souřadnice bodů	[m]
τ	- celkový čas svařování	[s]
t	- okamžitý čas svařování	[s]
v	- rychlost svařování	[m · s ⁻¹]
z_k	- souřadnice osy z při ukončení svařování	[m]
f_1, f_2	- konstanty ovlivňující rozložení intenzity toku energie do materiálu	[-]

Pro použití dvouelipsoidního modelu je třeba znát velikosti natavené oblasti (parametry a,b,c,d). Tyto parametry jsou zjišťovány na základě provedených experimentů a jsou odečteny z makrovýbrusů. Nemodifikovaný model dvouelipsoidního zdroje se využívá od roku 1997. V následujících letech bylo provedeno mnoho numerických analýz s tímto zdrojem tepla. Na základě provedených prací bylo konstatováno, že nelze tento model (tedy model v nemodifikované podobě) použít jako obecný zdroj pro všechny případy svařování. Proto se v současné době používají dvouelipsoidní zdroje tepla v modifikované podobě. Modifikace spočívá ve změně konstant v exponentu. Modifikovaný zdroj lze použít pro většinu metod tavného svařování, ovšem mimo metod řezání (svařování) o vysoké koncentraci energie, jako je svařování laserem, plazmou nebo svazkem elektronů.

6.1.2. 3D Gaussian

3D Gaussian (obr.6.2.) je modelovým zdrojem tepla, kde kuželový tvar umožňuje namodelovat vysokou energii řezacího případně svařovacího procesu laseru a elektronového paprsku. Matematicky lze 3D Gaussian popsat následujícími rovnicemi (38) a (39). Rovnice (38) popisuje hustotu tepelného toku do materiálu v závislosti na prostorových souřadnicích [33].



Obr. 6.2. Model tepelného zdroje - 3D Gaussian

$$q(x, y, z) = \frac{q(x, y)}{z_\tau} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2(z)}\right) \quad (38)$$

$$r_0^2(z) = r_e + \frac{r_i - r_e}{z_i - z_e} (z - z_e) \quad (39)$$

Rovnice (39) doplňuje rovnici (38) o parametry tvaru ve směru tloušťky materiálu [27].

$q(x, y)$	- špičková plošná hustota výkonu zdroje	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
z_τ	- hloubka protavení v závislosti na ploše	$[\text{m}]$
r_e, r_i	- poloměry 3D Gaussianu	$[\text{m}]$
z_e, z_i	- určují délku kužele 3D Gaussianu	$[\text{m}]$

Pro ověření platnosti těchto modelů je nutné znát jejich parametry včetně parametrů použitých zdrojů. Pro další výzkum této problematiky by bylo jistě zajímavé toto ověření provést, nicméně vzhledem ke zvolenému tématu bylo od podrobnějšího zkoumání v této oblasti upuštěno. Obecně lze konstatovat, že největší vliv na vlastnosti materiálu v tepelně ovlivněné oblasti má hustota tepelného toku to materiálu a fyzikální vlastnosti děleného materiálu.

7. CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH ZKOUŠEK

Pro experimentální část jsou voleny zkoušky s ohledem na zkoumanou problematiku. Cílem vybraných zkoušek je zatěžovat vzorek do mezního stavu tak, aby se co nejvíce přiblížily reálnému procesu tažení. Pro doplnění budou u každé technologie provedeny metalografické výbrusy a změřena mikrotvrdost s cílem zjistit případnou změnu struktury a tvrdosti (zejména u „teplých“ technologií). U technologie stříhání pak také monitorovat jednotlivá pásma stříhu a vznik mikrotrhlin.

V experimentální části jsou provedeny následující zkoušky:

- **Statická zkouška tahem** - zjištění základních mechanických charakteristik zkoušených materiálů a stanovení KUT. Porovnání změny základních mechanických hodnot v závislosti na zvolené technologii přípravy. Vzhledem k jednoosému stavu napjatosti představuje tato zkouška nejjednodušší způsob zatěžování. Hlavním významem této zkoušky je stanovit a tím současně ověřit základní mechanické hodnoty testovaných materiálů udávaných výrobcem. Pro stanovení vlivu technologie bude testován pouze směr válcování - tedy 0° . U série broušených vzorků měřeny 3 směry (0° , 45° , 90°) pro stanovení vlivu směru válcování na mechanické hodnoty.
- **Zkouška rozšiřováním otvoru (dle Siebela a Pompa)** - vypočtení velikosti tangenciální deformace φ_t v závislosti na způsobu přípravy kruhového otvoru. U technologie stříhání zjištění závislosti střížné vůle na velikosti tangenciální deformace (φ_t).
- **Zkouška třibodovým ohybem** – zjištění rozložení deformace a její maximální velikosti v těsné blízkosti trhliny systémem ARAMIS v závislosti na technologii dělení. Snímání síly v závislosti na dráze → změna mechanických vlastností (závislé na úhlu ohybu).
- **Dynamická zkouška rázem v ohybu (Charpyho kladivo)** – stanovení práce potřebné pro přeražení vzorku v závislosti na způsobu dělení → dopadová rychlost kladiva se blíží rychlosti při crash testech.

7.1. Statická zkouška tahem

Zkouška tahem je nejrozšířenější **základní mechanickou zkouškou** a je předepsaná normou ČSN EN 10002-1. Zkouška spočívá v deformaci zkušební tyče tahovým zatížením **do lomu**, za účelem stanovení základních mechanických vlastností. Zkušební tyče mohou být poměrné nebo nepoměrné. U poměrných je počáteční měřená délka vztažena k počáteční

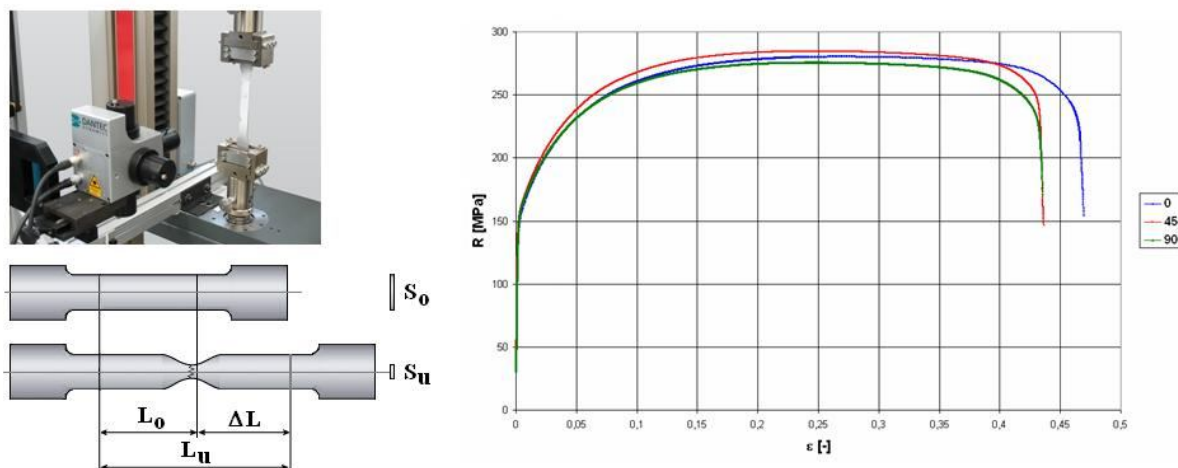
ploše příčného (nejčastěji kruhového) průřezu tyče S_0 . Nepoměrné jsou takové, u nichž není počáteční měřená délka L_0 vázána na počáteční průměr tyče, který je nyní obdélníkový. Příklad provedení některých tvarů a velikostí zkušebních poměrných (kruhových) a nepoměrných (plochých) tyčí je znázorněn na obrázku 7.1.



Obr. 7.1. Příklady zkušebních těles pro statickou zkoušku tahem

Tahová zkouška je pro plechy prováděna na normalizovaných nepoměrných zkušebních tyčích, které se upínají do čelistí zkušebního stroje tak, aby osa zkušební tyče ležela v ose čelistí.

Podmínky zkoušky, zejména teplota a rychlost zatěžování (nejčastěji použita hodnota $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), jsou taktéž dány zmiňovanou normou. Při zkoušce se registruje zátěžná síla F a jí odpovídající deformace. Zkušební tyč zatěžovaná silou se prodlužuje z počáteční měřené délky L_0 (která činí nejčastěji 50, 80, 100, 120 nebo 200 mm) na konečnou měřenou délku po lomu L_u . Počáteční plocha příčného průřezu zkoušené délky zkušební tyče S_0 se přitom mění na konečnou plochu S_u , tedy nejmenší plochu příčného průřezu po lomu. V průběhu zkoušky je možno stanovit normálové napětí (smluvní, resp. jmenovité značené R) jako podíl zatěžující síly F a počáteční plochy příčného průřezu zkoušené délky S_0 . Z délkové deformace měřeného úseku zkušební tyče, vztažené na původní rozměr tohoto úseku, lze stanovit hodnotu tzv. poměrného prodloužení ε (smluvní deformace). Výsledkem měření je smluvní tahový diagram o souřadnicích smluvní napětí R vynesené na ose y a poměrné prodloužení ε vynesené na ose x, jak je znázorněno na obr. 7.2.



Obr.7.2. Prodloužení zkušební tyče a smluvní tahový diagram

Ze zkoušky tahem lze určit důležité charakteristiky materiálů, jako je výrazná mez kluzu R_e , nevýrazná mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti v tahu R_m , poměrná deformace (poměrné prodloužení) ε , kontrakce Z nebo tažnost A_x (kde index x u nepoměrné zkušební tyče značí použitou počáteční měřenou délkou L_0 a nabývá tedy hodnot 50 mm, 80 mm, 100 mm, 120 mm nebo 200 mm). Zjištěné smluvní hodnoty napětí a deformací lze, dle vztahů (40), přepočítat na hodnoty skutečných napětí (σ_e , $\sigma_{p0,2}$ a σ_m) a skutečných deformací (φ_e , $\varphi_{p0,2}$ a φ_m).

$$\begin{aligned}\sigma &= R(\varepsilon + 1) \text{ [MPa]} \\ \varphi &= \ln(\varepsilon + 1) \text{ [-]}\end{aligned}\tag{40}$$

a) Definice základních veličin

Výrazná mez kluzu R_e je definována, u materiálů vykazujících plastický kluz, jako napětí, při jehož dosažení dochází k plastické deformaci bez přírůstku zatížení. Lze ji také snadno určit ze vztahu (41). Výraznou mez kluzu můžeme dále rozdělit na horní mez kluzu R_{eH} a dolní mez kluzu R_{eD} .

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [MPa]}\tag{41}$$

F_e - síla odpovídající výrazné mezi kluzu [N]

S_0 - počáteční plocha příčného průřezu zkoušené délky [mm²]

Nevýrazná mez kluzu $R_{p0,2}$ se určuje ze síly odpovídající trvalé absolutní deformaci $\Delta L = 0,2\%$. L_0 a je dána vztahem (42).

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_o} \text{ [MPa]} \quad (42)$$

$F_{p0,2}$ - síla odpovídající nevýrazné mezi kluzu [N]

Mez pevnosti R_m je napětí, definované vzorcem (43) jako poměr maximální síly zjištěné při zkoušce tahem a počáteční plochy příčného průřezu zkoušené délky.

$$R_m = \frac{F_m}{S_o} \text{ [MPa]} \quad (43)$$

F_m - největší zatížení [N]

Kontrakce Z , neboli zúžení, vyjadřuje procentuální poměr největší změny plochy příčného průřezu přetržené zkušební tyče k jejímu původnímu průřezu. Tato veličina se však v technické praxi určuje pouze u tyčí kruhových, a to dle vztahu (44).

$$Z = \frac{\Delta S}{S_o} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (44)$$

ΔS - největší změna plochy příčného průřezu [mm^2] $\Delta S = S_o - S_u$

S_u - nejmenší plocha příčného průřezu po lomu [mm^2]

Poměrné prodloužení ε je definováno dle vztahu (45) jako přírůstek počáteční měřené délky vztažený na počáteční měřenou délku zkušební tyčky.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \text{ [-]} \quad (45)$$

ΔL - přírůstek počáteční měřené délky po přetržení [mm] $\Delta L = L_u - L_o$

L_u - konečná měřená délka po lomu [mm]

L_o - počáteční měřená délka [mm]

Tažnost lze poté definovat, s použitím vzorce (46), jako poměrné prodloužení ε vyjádřené v procentech [34, 35].

$$A_x = \frac{\Delta L}{L_o} \cdot 100 = \varepsilon \cdot 100 \text{ [%]} \quad (46)$$

b) Ukazatele tvářitelnosti

Pro upřesnění názoru, zda je materiál vhodný pro zvolenou tvářecí operaci, je dobré zjistit další zpřesňující technologické parametry a ukazatele. Ty lze většinou snadno dopočítat s využitím již zjištěných údajů z tahové zkoušky.

Pro potřeby hlubokého tažení je důležitý vysoký podíl hodnot meze kluzu a meze pevnosti, který dobře zohledňuje zásoba plasticity ZP , daná vztahem (47).

$$ZP = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (47)$$

k - koeficient zaplnění plochy (0,6 - 0,9) [-]

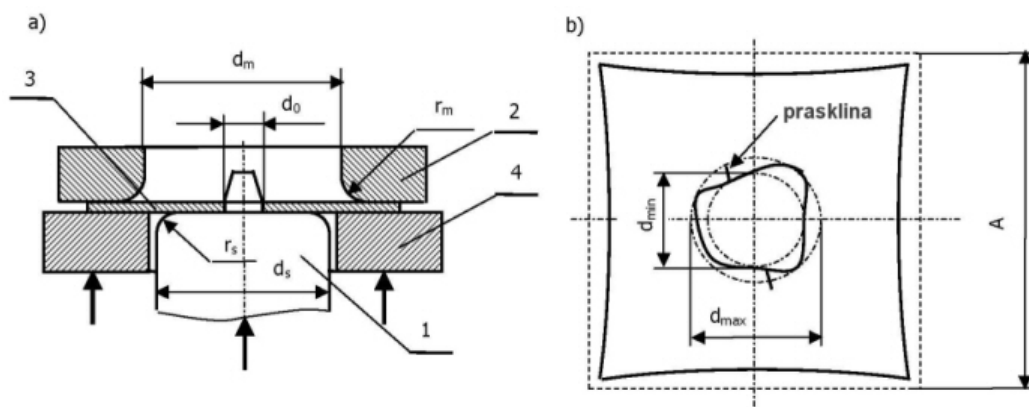
Dalšími často používanými ukazateli jsou ukazatel hlubokotažnosti UH a komplexní ukazatel tvářitelnosti KUT , dané vztahy (48) a (49).

$$UH = \frac{R_{p0,2}}{R_m} \text{ [-]} \quad (48)$$

$$KUT = \frac{R_{p0,2}}{R_m} \cdot A_x = UH \cdot A_x \text{ [-]} \quad (49)$$

7.2. Zkouška rozšiřováním otvoru

Zkouška rozšiřováním otvoru je nazvána podle badatelů **Siebela a Pompa**. Princip zkoušky spočívá v rozšiřování otvoru (obr. 7.3.), který je uprostřed kruhového či čtvercového přístřihu. Konec zkoušky nastává v okamžiku, kdy se na obvodu otvoru objeví první radiální trhlinka [36].



Obr. 7.3. Princip zkoušky rozšiřováním otvoru dle Siebela a Pompa

Výsledkem měření je velikost lomové tangenciální deformace φ_t , která je dána vztahem (50).

$$\varphi_t = \ln \cdot \frac{d_1}{d_0} \quad [-] \quad (50)$$

d_0 - počáteční průměr rozšiřovaného otvoru [mm]

d_1 - konečný průměr rozšiřovaného otvoru [mm]

Vlivem plošné anizotropie není rozšířený otvor pravidelně kruhový a určí se ze vztahu (51).

$$d_1 = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} \quad [\text{mm}] \quad (51)$$

d_{\max} - maximální průměr rozšířeného otvoru [mm]

d_{\min} - minimální průměr rozšířeného otvoru [mm]

Dalším kritériem, které se dá posuzovat, je hloubka tahu z , poměrné rozšíření otvoru d' a plošná anizotropie Δr (52, 53).

$$d' = \frac{1}{2} \cdot (d_{\max} - d_{\min}) \quad (52)$$

$$\Delta r = \frac{(d_{\max} - d_{\min})}{d'} \quad (53)$$

Ukazatel tvářítečnosti je dán vztahem (54)

$$q = \frac{(d_{\max} - d_{\min})^2}{4 \cdot d_0 \cdot (d_{\max} - d_{\min})} \quad (54)$$

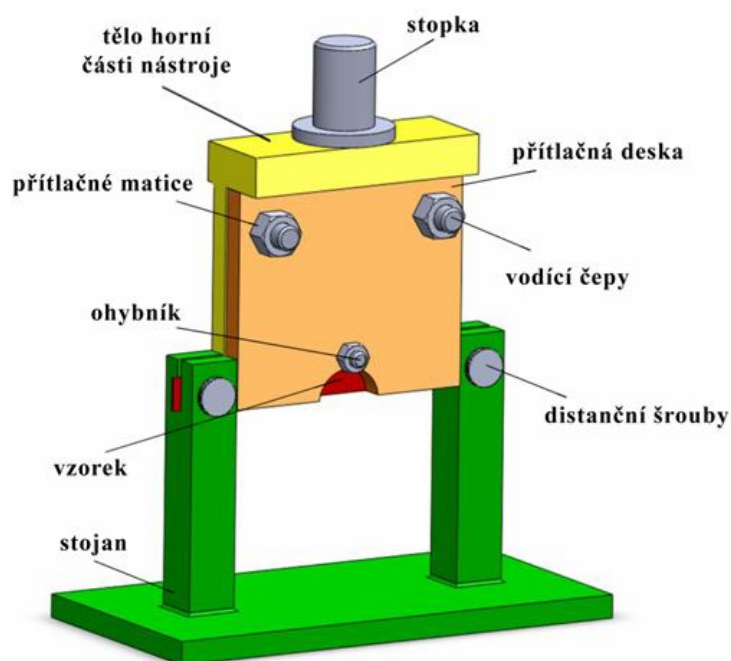
7.3. Zkouška tříbodovým ohybem

Statická zkouška tříbodovým ohybem se používá hlavně při zkoušení křehkých materiálů, zejména litiny. U houževnatých materiálů nemá význam, neboť k porušení zkušebního tělesa ohybem nedojde – zde se uplatňuje hlavně jako zkouška technologická, případně jako zkouška ohybem u hotových součástí a u různých konstrukčních celků (mostů, jeřábů, křídel...).

Pro dosažení mezního stavu (vzniku trhliny) v důsledku ohybového zatížení vzorku byl zkonstruován přípravek, který umožní jeho namáhání na výšku (obr. 7.4.). Vzorek o rozměrech 220 x 20 x t [mm] je v nástroji umístěn tak, aby zkoušená hrana byla v nástroji

směrem dolů (horní hrana je kvůli dosažení konstantní šířky vzorku broušena). Polohu vzorku v přípravku zajišťuje stojan, který je tvořen základovou deskou a dvojicí pevných sloupků. Vzdálenost podpor zkušebního přípravku je 150 mm, což je zároveň nejmenší vzdálenost mezi sloupky (podporu tvoří v podstatě hrana sloupku). Každý ze sloupků je opatřen drážkou o šířce 4 mm pro vložení vzorku a aretačními šrouby pro vymezení vůle. To zajišťuje suvné uložení vzorku ve stojanu, což je nezbytné při vlastním ohýbání (vzorek se v drážkách pohybuje směrem dovnitř – vtahuje se). Horní díl přípravku je tvořen upínací stopkou, která přechází v základní desku. V této desce jsou umístěny čepy s licovanou částí zakončenou závitem M16. Tyto čepy slouží k přitlačení vodící desky, která v kombinaci se základní deskou zajišťuje konstantní vůli. Tato vůle je dána aktuální tloušťkou vzorku. Mezi základní a vodící deskou se v dolní části vkládá vlastní vzorek, nad čepy se vkládá rovněž pásek plechu ustřižený z plechu stejné tloušťky, jako vzorek. To zajišťuje požadovanou vůli v celém rozsahu ohybu. Umístění vzorku do přípravku je provedeno jeho vsunutím mezi základní a vodící desku a jemným dotažením dvojic matic M16 a v dolní části matice M10. Tato matice tvoří celek s ohybníkem, který je zalisován v základní desce. Pomocí matice M10 je zajištěna vůle v dolní části nástroje. To zajišťuje, že vzorek při ohybu nevybočí a praskne v oblasti s nejvyšším tahovým napětím, které je na spodní (zkoušené) hraně.

Spodní díl přípravku se vzorkem je umístěn na příčniku zkušebního zařízení **Tira Test 2300**. Horní díl přípravku je pevně spojen pomocí stopky se snímací hlavou. Přípravek se vzorkem (3D model) je na obr. 7.4.



Obr. 7.4. Model zkušebního zařízení pro tříbodový ohyb

Do zkoušky vstupuje parametr, na kterém závisí přesnost měření a tím je koeficient tření. Ten vzniká jak mezi vzorkem a stojánkem, tak mezi základní a vodící deskou. Snahou není zcela eliminovat toto tření, ale pouze zajistit, aby byla jeho hodnota při všech měřeních přibližně stejná. Toho lze dosáhnout tím, že všechny vzorky i funkční plochy nástroje budou připraveny stejným způsobem (např. mazány) a že všechny matice vodící desky budou dotaženy přibližně stejným velkým utahovacím momentem.

Výsledkem zkoušky je především velikost deformace v těsné blízkosti okolí trhliny a průběh síly v závislosti na dráze (hloubce ohybu). Tam, kde k dosažení mezního stavu (vzniku trhliny) bude potřeba většího úhlu ohybu bude místo ohybu více deformačně zpevněné - tzn., že i potřebná síla bude vyšší. Zároveň pro větší úhel ohybu bude platit, že v okolí trhliny bude deformace vyšší.

Pro stanovení velikosti deformace lze postupovat různými způsoby:

Do předpokládaného místa vzniku trhliny lze nanést geometricky přesné měřítko (např. rysky, deformační síť apod.). Po dosažení mezního stavu si vyberme element, který je v těsné blízkosti trhliny. Z velikosti elementu před deformací (l_0) a po deformaci (l) stanovené přepočtem z poloměru ohybu lze stanovit velikost logaritmické deformace podle vztahu (55).

$$\varphi = \ln \frac{l}{l_0} \quad [-] \quad (55)$$

Tento způsob má však nevýhodu v tom, že výsledná deformace je v rámci jednoho elementu měřítka průměrná, ale ve skutečnosti se poměrně významně mění v závislosti na vzdálenosti od trhliny. Další nevýhodou je, že poloměr ohybu by měl korespondovat s geometrií nástroje, ale ve skutečnosti tomu tak není (výška pásku plechu situovaného v nástroji je 20 mm). Proto i přepočet na skutečnou velikost elementu po deformaci (l) je nepřesný. V neposlední řadě je tímto způsobem deformace mapovatelná v podstatě jen na hraně vzorku. Můžeme tímto způsobem usuzovat (s respektováním výše řečených nevýhod) na maximální deformaci v blízkosti trhliny, ale tato metoda již neumožňuje zmapovat deformaci dále od hrany.

Pro popis chování vzorku při ohybu lze rovněž využít matematického popisu (řešení pomocí pružnosti a pevnosti). Tímto způsobem však nelze popsat a podchytit vliv jednotlivých technologií dělení na výslednou velikost plastické deformace. Lze pouze stanovit

maximální sílu potřebnou k dosažení mezního stavu při daných podmínkách zatěžování, materiálových hodnotách a rozměrech vzorku. Proto je tento popis v tomto případě nepoužitelný.

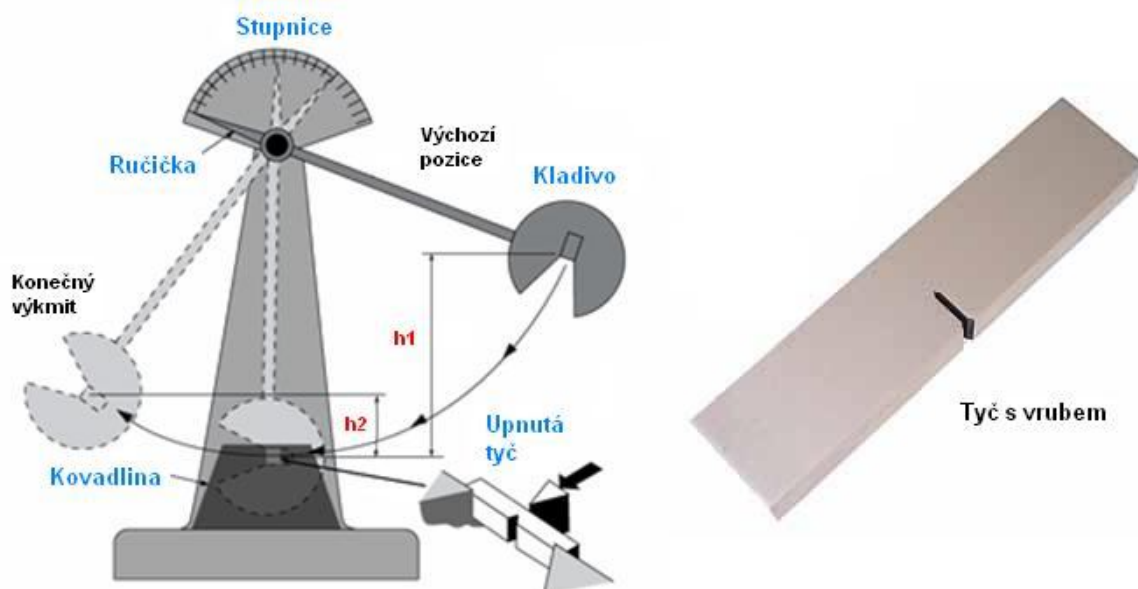
Metoda, která byla vybrána pro popis deformované oblasti v experimentální části, je založena na mapování deformace pomocí **bezkontaktního měřicího systému** (konkrétně systému ARAMIS od německé firmy GOM). Výsledkem jsou 3D vizualizace zachycené s určitou frekvencí snímkování, kde lze přesně (v tomto konkrétním případě) predikovat místo vzniku trhliny, rozložení deformace v okolí trhliny a stanovit maximální velikost deformace, která je kritériem pro hodnocení vlivu způsobu dělení na následné plastické vlastnosti.

V návaznosti na řešené téma byla vypracována zcela nová metodika měření včetně konstrukce a výroby zkušební přípravku. Na zkušební přípravek se vztahuje užitečný vzor (viz kap. 16. Publikační činnost).

7.4. Zkouška vrubové houževnatosti

Náchylnost materiálů na vrubovou houževnatost je důležitým parametrem, který lze zjistit pomocí dynamických technologických zkoušek. Rychlosti zatěžování zkušebních těles jsou zde nesrovnatelně vyšší než u zkoušky tahem, neboť rychlost dopadového zařízení činí 5 až 7 m·s⁻¹. S rostoucí rychlostí vzrůstá i odpor materiálu proti přetvoření. Materiál, který se při statickém zatěžování chová jako houževnatý, se může při dynamickém zatížení porušit křehkým lomem. Základní a nejpoužívanější zkouškou pro zjištění vrubové houževnatosti materiálů je zkouška rázem v ohybu podle Charpyho.

Tato zkouška je dána normou ČSN EN 10045-1, která definuje základní podmínky zkoušky (zejména rychlost), rozměry zkušebních vzorků a také způsob vyhodnocení naměřených hodnot. Princip zkoušky (obr. 7.5.) je velice jednoduchý a spočívá v přerážení normalizovaných tyček kyvadlovým kladivem. Zkušební tyč má rozměry 10x10x55 mm (vyjimečně 7,5x10x55 mm nebo 5x10x55 mm) a je uprostřed své délky opatřena vrubem. Vrub může mít tvar U nebo V a jeho přesné rozměry jsou opět dány normou. Mírou odolnosti materiálu proti rázu je nárazová práce spotřebovaná na přerážení tyče (dle vrubu označovaná **KU** nebo **KV**). Krom této hodnoty bývá zkoumána i vzniklá lomová plocha na zkušební tyči. Národní norma České republiky umožňuje také hodnotit vrubovou houževnatost (dle vrubu označovanou **KCU** nebo **KCV**), která se získá jako poměr nárazové práce a plochy průřezu pod vrubem zkušební tyče. Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho je empirickou zkouškou a její výsledky slouží k vzájemnému porovnání jednotlivých materiálů zkoušených za stejných technologických podmínek.



Obr. 7.5. Princip rázové zkoušky v ohybu podle Charpyho

Pro zkoušky vrubové houževnatosti tenkých plechů (0,5 až 2,5 mm) bohužel nelze použít zmiňovanou normu ČSN EN 10045-1, neboť jsou rozměry zkušebních tyčí pro náš případ nevyhovující ($t_{\min} = 5$ mm). Navíc výše zmiňovaná norma předpokládá zkušební těleso s vrubem, což není pro hodnocení vlivu technologie dělení relevantní. To ovšem neznamená, že tuto zkoušku nemůžeme použít pro hodnocení jednoho materiálu měřeného za různých technologických podmínek (technologií přípravy). Takovéto experimenty byly již provedeny a jejich výsledky byly více než uspokojivé [11, 37].

8. CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Cílem práce je zjistit, jaký vliv má způsob přípravy (dělení vysokopevnostních plechů) na jeho následné plastické vlastnosti. Téma bylo stanoveno na základě potřeb automobilového průmyslu, kde hlavním problémem je vznik trhlin ve výztuhách lisovaných za studena z materiálů třídy UHSS. Tyto trhliny vznikají v důsledku vyčerpání plasticity materiálu, kde nezanedbatelný vliv má právě způsob jeho dělení. Cílem práce je vypracovat metodiku, která pomůže při výběru vhodného způsobu dělení daného materiálu (resp. skupiny materiálů), případně navrhnout opatření, jak u konkrétní skupiny materiálů dosáhnout lepších výsledků změnou technologie.

Cíle disertační práce lze rozdělit do několika dílčích skupin. V teoretické části jsou detailně zmapovány možnosti dělení vysokopevnostních plechů v prototypové i sériové výrobě, jejich výhody i nevýhody a možnosti zkoušení vlivu řezné hrany na následné plastické vlastnosti.

Experimentální část je zaměřena na popis zkoušených materiálů, jejich využití v konstrukci karoserií a způsoby technologického případně tepelného zpracování. Stěžejní částí experimentální části je provedení 4 základních zkoušek na dvou testovaných materiálech tak, aby se co nejvíce přiblížily reálnému stavu tváření s cílem stanovit vliv způsobu dělení na chování plechu při tváření (v modelovém případě při experimentálních zkouškách). Součástí souboru zkoušek je i nalezení vlivu sřížné mezery na velikosti maximální dosažené deformace.

8.1. Volba a definice mezního stavu

Na tomto místě je vhodné nejprve definovat pojem **stabilita procesu lisování**. Při výrobě výlisků karosářského typu je důležité, aby tyto splňovaly určité předpoklady. Podle funkce a charakteru výlisků je můžeme dělit na 2 základní kategorie:

Pohledové výlisky – neakceptují se žádné vady, které by mohly způsobit po lakování vznik zmetku. Takové vady jsou velmi často způsobeny i pouhým zašpiněním lisovacího náradí, jindy to je vznik propadlin, vln a v mezním případě vznik trhliny způsobený vyčerpáním zásoby plasticity materiálu případně i nevhodnou geometrií nástroje. Pohledové díly se vyrábí výhradně technologií tváření za studena, což v důsledku znamená, že díl je deformačně zpevněný. Při využití plechů vykazující BH efekt je díl zpevněný jak deformačně, tak tepelně při vypalování laku karoserie.

Výztuhy - v tomto případě nehraje povrch výlisku prakticky žádnou roli. Mnohem podstatnější je, zda na výlisku nejsou kritická místa v podobě trhlin a jakou zásobu plasticity si finální díl ponechá po tvářecím procesu. Výlisky tohoto typu se vyrábějí technologií tváření za studena i za tepla, kdy se často kombinuje tváření s tepelným zpracováním přímo v nástroji (tzv. termomechanické zpracování).

Z výše řečeného vyplývá, že pokud má být proces lisování stabilní, nesmí se v průběhu tváření vyskytnout na výlisku žádné vady, které způsobí, že je pro nás výlisek nepoužitelný. Velmi často se v této souvislosti hovoří o ztrátě stability na mezi pevnosti, ztrátě stability po vyčerpání zásoby plasticity atd. Vztah mezi stabilitou tvářecího procesu a mezním stavem je potom charakterizován tak, že pokud má být proces tváření stabilní, nesmíme dosáhnout mezního stavu. Pro materiálové zkoušky je mezní stav většinou definován s ohledem na reálný proces lisování. Většinou je mezní stav definován lomem zkušebního tělesa nebo vznikem prvních viditelných trhlin, někdy je to dosažení meze pevnosti materiálu atd.

Před vlastní experimentální částí je nutné zvolit mezní stav s ohledem na jednotlivé zkoušky.

U **statické zkoušky tahem** je mezní stav určen poklesem maximální síly o 60%. Zkouška je tedy ukončena až po dolomení vzorku v celém průřezu. Při jednoosém namáhání prostým tahem materiálů s touto charakteristikou je prakticky nemožné ukončit zkoušku v počátečním stádiu vzniku trhliny (což by s ohledem na zkoumanou problematiku bylo výhodnější). Navíc pro získání kompletních materiálových charakteristik (tažnost A_{50mm}) je nutné zkoušku ukončit až po přetržení vzorku.

Zkouška **rozšiřováním otvoru** je charakterizována rozšiřováním otvoru o průměru d_0 válcovým tažníkem do vzniku první radiální trhliny na obvodu otvoru. I zde platí, že oba testované materiály mají relativně malou schopnost se deformovat a jejich porušení je náhlé (bez předchozí výrazné deformace v okolí vznikající trhliny). Proto ke vzniku mezního stavu dochází najednou a prakticky křehkým porušením. Nutno poznamenat, že tato skutečnost nemá významný vliv na velikost vypočtené tangenciální deformace, protože po odlehčení válcového tažníku se tato trhlina (případně trhliny) vrátí k sobě.

Zkouška **tříbodovým ohybem** je vedle zkoušky rázem v ohybu zkouškou, kde lze velmi přesně určit mezní stav. Je to dáno způsobem snímání deformace pomocí bezkontaktního optického systému ARAMIS, kde je možné „listováním“ po jednotlivých snímcích přesně určit okamžik vzniku první viditelné trhliny (v konečné fázi ohybu je snímáno 6 snímků za sekundu). Vypočtená deformace je tak stanovena z předešlého snímku, který se dle definice nejvíce blíží meznímu stavu.

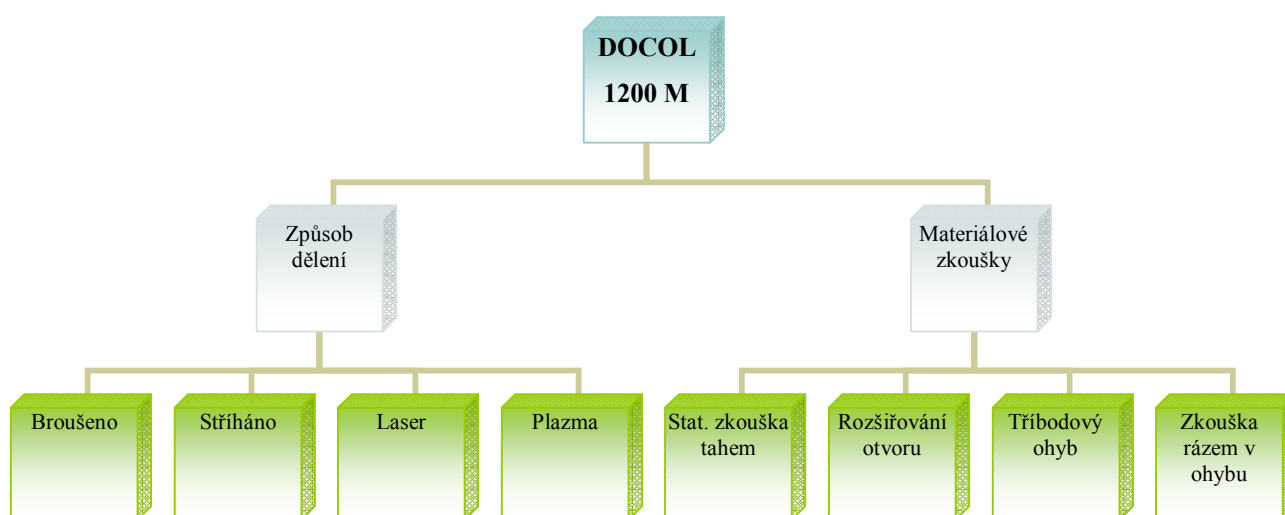
Zkouška **rázem v ohybu** je ukončena lomem vzorku v celém průřezu, což je zároveň mezní stav. Porovnávacím kritériem je potom velikost práce spotřebovaná na přeražení vzorku. Jako u zkoušky tříbodovým ohybem je zde mezní stav jasně definován. Mezní stavy jednotlivých zkoušek jsou uvedeny v tab. 8.1.

Tab. 8.1. Mezní stavy jednotlivých zkoušek

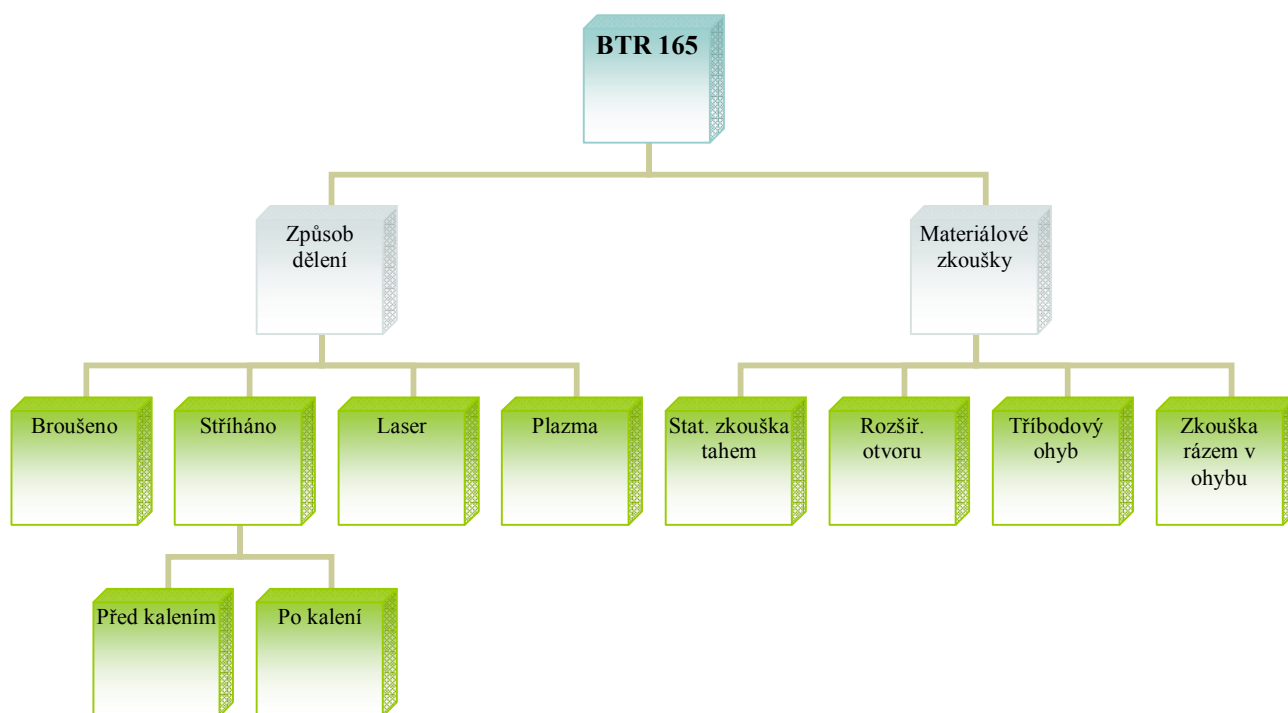
<i>zkouška</i>	<i>zvolený mezní stav</i>
statická zkouška tahem	lom vzorku
zkouška rozšiřováním otvoru	vznik první viditelné trhliny
zkouška tříbodovým ohybem	vznik trhliny a pokles síly o 30 % F_{\max} .
zkouška rázem v ohybu	lom vzorku v celém průřezu

8.2. Schéma experimentu

Na obr. 8.1. a 8.2. je pro lepší představu znázorněno schéma experimentu z hlediska technologie přípravy (způsobu dělení) a materiálových zkoušek. U materiálu BTR 165 je experiment rozšířen o sadu vzorků připravovaných ještě před kalením, což sleduje sériovou technologii výroby.



Obr. 8.1. Schéma experimentu (DOCOL 1200 M)



Obr. 8.2. Schéma experimentu (BTR 165)

9. STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA TESTOVANÝCH MATERIÁLŮ

Pro experimentální část byly s ohledem na zkoumanou problematiku a požadavky zadavatele vybrány 2 martenzitické materiály skupiny UHSS. První z nich s obchodním názvem **DOCOL 1200 M** (SSAB) je určen ke zpracování za studena a je tedy výrobcem dodáván v tepelně upravené podobě. Naopak materiál s obchodním názvem **BTR 165** (Benteler) je určen k termomechanickému zpracování a je výrobcem dodán v tepelně nezpracovaném stavu.

9.1. DOCOL

Docol je obchodní název za studena válcovaného plechu švédské firmy SSAB Swedish Steel. Materiály typu Docol zahrnují všechny druhy ocelí od nízkouhlíkových (určených pro běžné technologie lisování a ohýbání) až po pevnostní a ultra-vysokopevnostní oceli. Tyto materiály můžeme také dále dělit na martenzitické oceli válcované za studena (příklad označení Docol 1200 M) a martenzitické oceli válcované za studena pozinkované (příklad označení Docol 1200 M+ZE). Použitím pevnostních ocelí místo ocelí běžných pevností, získáme úsporu hmotnosti konstrukce, velmi vysokou pevnost karosérie, zvýšenou bezpečnost, vyšší životnost dílů, zvýšené užitečné zatížení nebo poměrně výraznou úsporou celkových nákladů.

Pevnostní a ultrapevnostní materiály typu Docol mají velký rozsah využití v různých technických oborech a používají se pro řadu aplikací, například na bezpečnostní součásti automobilové karosérie (jak je ukázáno na obrázku obr. 9.1.), elektrické a horkovodní radiátory, chladiče, kontejnery, pružiny, podložky nebo na spojkové lamely [38].

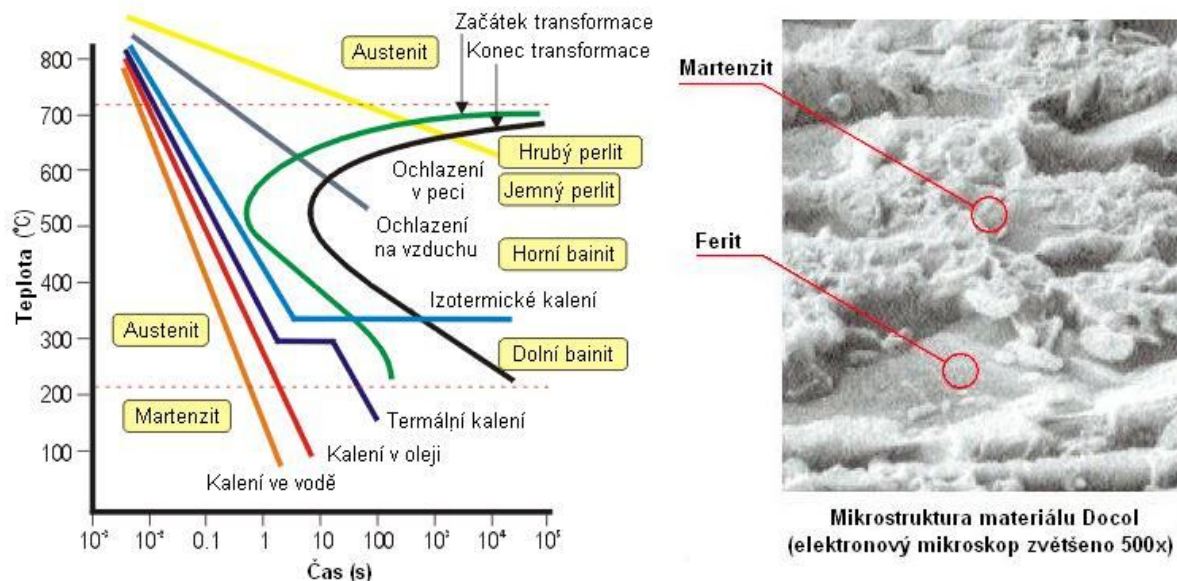


Obr. 9.1. Příklady výrobků zhotovených z materiálu Docol

Jak již bylo řečeno, oceli značky Docol jsou k dispozici v široké škále pevností vhodných pro různé aplikace. Oceli vyšších pevností mají větší potenciál pro úsporu hmotnosti (tato úspora může být více než 40% při zachování hodnoty pevnosti), avšak s rostoucí pevností materiálu se obecně také snižuje jeho tvárnost. Volba vhodného materiálu pro daný výrobek tedy závisí na kombinaci požadované pevnosti, tvárnosti a velikosti nákladů. Úspora hmotnosti je důležitým hlediskem, zvláště v automobilovém průmyslu. Vysokopevnostní oceli nám poskytují obrovskou příležitost k úspoře hmotnosti. Tváření pevnějších materiálů sice vyžaduje více energie, je však částečně kompenzováno menší tloušťkou.

9.1.1. DOCOL 1200 M

Materiál Docol 1200 stupně M je martenzitická ocel vyráběná válcováním za studena s použitím speciálního tepelného zpracování na kontinuální žíhací lince. Jeho vysoká pevnost je vytvořena extrémně rychlým vodním ochlazením z vysoké austenitické teploty. Tento pevnostní materiál je charakterizován poměrně dobrou tvárností při extrémně vysoké hodnotě pevnosti a dobrou svařitelností danou smíšenou **feriticko-martenzitickou** strukturou. Lze použít všechny běžné metody svařování s přihlédnutím k chemickému složení této oceli. Vznik martenzitické struktury a její detail pořízený elektronovým mikroskopem s dobře patrnými jednotlivými fázemi je znázorněn na obrázku obr. 9.2. [38].



Obr. 9.2. Způsob vzniku martenzitické struktury a její mikrostruktura

a) Základní materiálové hodnoty Docolu 1200 M

Plechý z materiálu Docol 1200 M jsou vyráběny v šířkách 800-1500 mm a tloušťkách 0,5-2,0 mm. Materiál Docol 1200 M je dodáván v tolerancích dle evropské normy EN 10 131. Materiálové vlastnosti jsou pochopitelně proměnné nejen pro rozdílné svitky, ale také uvnitř vlastního svitku. Firma SSAB Swedish Steel zaručuje pouze takové materiálové hodnoty, které jsou uvedené v materiálovém listě. Takovými typickými hodnotami jsou například minimální mez kluzu, minimální mez pevnosti v tahu a tažnost. Základní parametry zvoleného materiálu jsou přehledně zpracovány v tab. 9.1.

Tab. 9.1. Materiálové hodnoty udávané výrobcem pro Docol 1200 M

Chemické složení [%]	C	Si	Mn	P	S	Nb	Al
	0,110	0,200	1,600	0,015	0,002	0,015	0,040
Mechanické hodnoty	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]			950 – 1200			
	$R_{p0,2}$ po BH efektu [MPa]			min. 1150			
	Mez pevnosti R_m [MPa]			1200 – 1400			
	Tažnost $A_{80\text{ mm}}$ [%]			min. 4			

Pro porovnání uvádím tabulku 9.2. materiálových hodnot oceli MS-W 1200 firmy Thyssen Krupp Steel. Je patrné, že dostupné hodnoty si jsou velmi podobné [36].

Tab. 9.2. Materiálové hodnoty udávané výrobcem pro MS-W 1200

Chemické složení [%]	C	Si	Mn	P	S	Nb+Ti	Cr
	< 0,180	< 0,800	< 2,000	< 0,020	< 0,010	< 0,150	< 1,000
Mechanické hodnoty	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]			900 min			
	Mez pevnosti R_m [MPa]			1200 min - (1400 max)			
	Tažnost $A_{80\text{ mm}}$ [%]			5 min			

b) Vhodnost Docolu 1200 M pro jednotlivé technologie

Docol 1200 M je určen pro konvenční technologie tváření za studena, jako je například lisování, válcování, kontinuální ohýbání nebo výroba trubek. Ohýbatelnost tohoto materiálu je dobrá, přesnost poloměru ohybu bude větší, pokud budeme materiál ohýbat příčně na směr válcování. Zde je totiž ohýbatelnost o něco lepší než ve směru podélném. Pokud stříháme a děrujeme tento materiál, je zvláště zajímavé použití přesného stříhání. Ovlivňujícími faktory jsou tloušťka plechu, pevnost a požadavek na kvalitu střížné plochy. Máme zaručenu kvalitní střížnou plochu minimálně 10-12% z tloušťky plechu. Svařitelnost je velmi dobrá, neboť materiál Docol má velmi nízký obsah legujících prvků současně s vysokou pevností. Docol svařujeme všemi běžnými metodami, jako je svařování elektrickým obloukem v plynné atmosféře, svařování metodou TIG, svařování plasmou, laserem nebo odporové bodové svařování [38, 39, 40].

9.2. BTR 165

Tento materiál patří do skupiny martenzitických ocelí a je určen pro následné termomechanické zpracování přímo v tvářecím procesu (ohřátý polotovár na přibližně 950°C je vložen do nástroje a je provedena tvářecí operace se současným chlazením). Tímto postupem označovaným jako termomechanické zpracování (někdy též kalení lisováním) je docíleno maximálního využití materiálového potenciálu. Jelikož se jedná o tváření za tepla, je vylisovaný díl ve výsledku deformačně nepevněný a výsledná pevnost v tahu po termomechanickém zpracování je v rozmezí 1500 až 1800 MPa (pevnost před zpracováním je cca 500 MPa). Postup je samozřejmě technologicky i energeticky náročnější než tváření za studena, nicméně zpracovávat materiál s takto vysokou hodnotou pevnosti jiným způsobem je v podstatě nemožné. Základní mechanické hodnoty materiálu jsou v tab. 9.3., změna mechanických vlastností v závislosti na tepelném zpracování je na obr. 9.4. Mimořádně vysoké mechanické hodnoty jsou dány opět smíšenou **feriticko-martenzitickou** strukturou

materiálu a předurčují ho k aplikacím, kde jsou kladeny extrémní nároky na pevnost dílů (exponované díly zejména přední a boční části karoserie) - obr. 9.5.

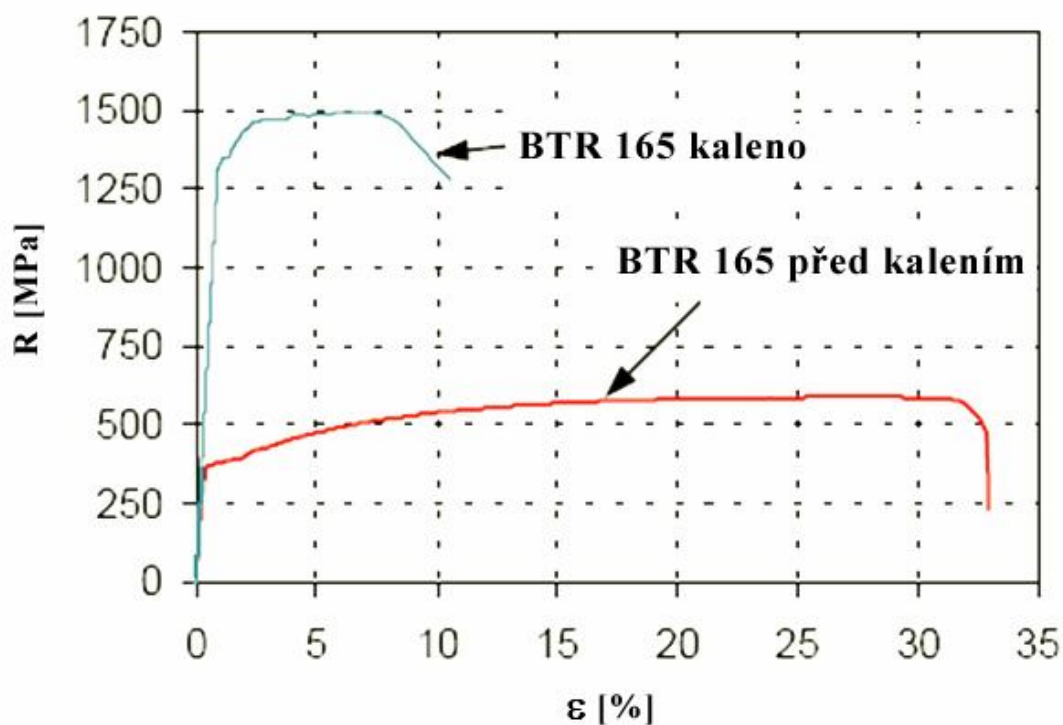
Tepelná vodivost, která úzce souvisí s rychlostí odvodu tepla při termickém dělení, je dána mechanickými hodnotami, kde obecně platí, že se zvyšující se pevností roste i elektrický odpor (klesá elektrická i tepelná vodivost materiálu). Z výše řečeného vyplývá, že materiál BTR 165 bude mít díky vyšším mechanickým hodnotám nižší tepelnou vodivost a tepelně ovlivněná oblast bude tedy menší než u materiálu DOCOL 1200 M (což se potvrdilo i v experimentální části při měření mikrotvrdosti - viz tab. 11.9. a 11.18.) [39].



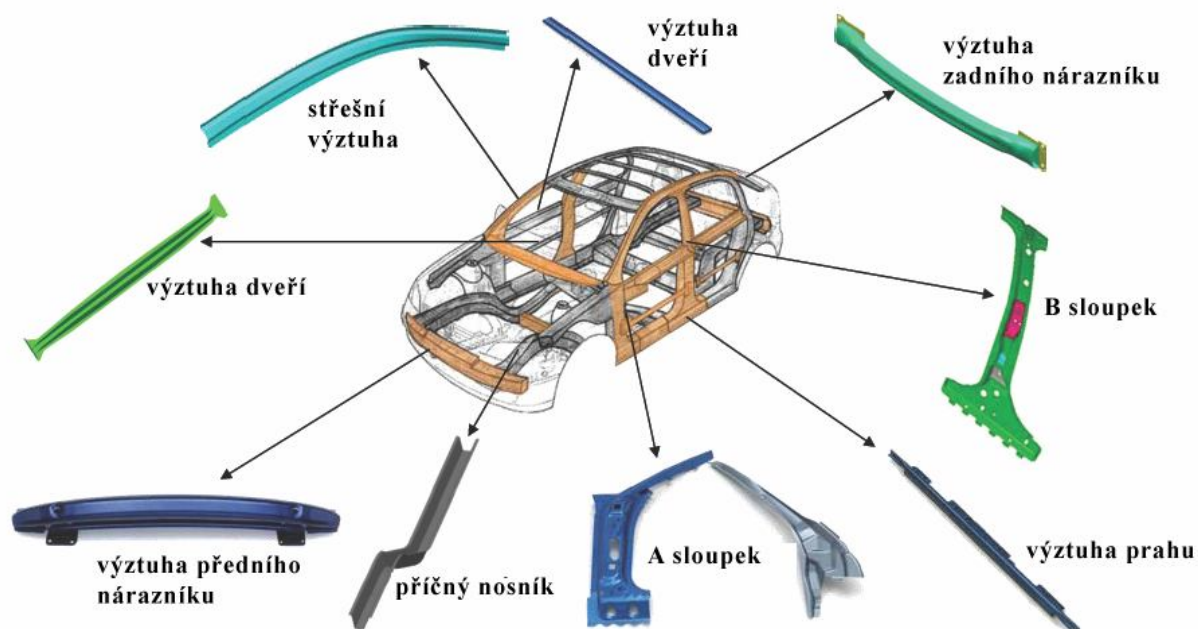
Obr. 9.3. Mikrostruktura BTR 165 po termomechanickém zpracování

Tab. 9.3. Základní mechanické hodnoty materiálu BTR 165

Stav dodání	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50mm} [%]
Kalení do vody, žiháno 250 °C	min. 1100	1400 - 1850	min. 8
Kalení do vody, žiháno 630 °C	min. 900	1000 - 1300	min. 10
Normalizační žihání	min. 320	520 - 640	min. 20
Žihání na měkko	min. 250	min. 400	min. 20



Obr. 9.4. Mechanické vlastnosti před a po tepelném zpracování



Obr. 9.5. Příklady aplikace materiálu BTR 165

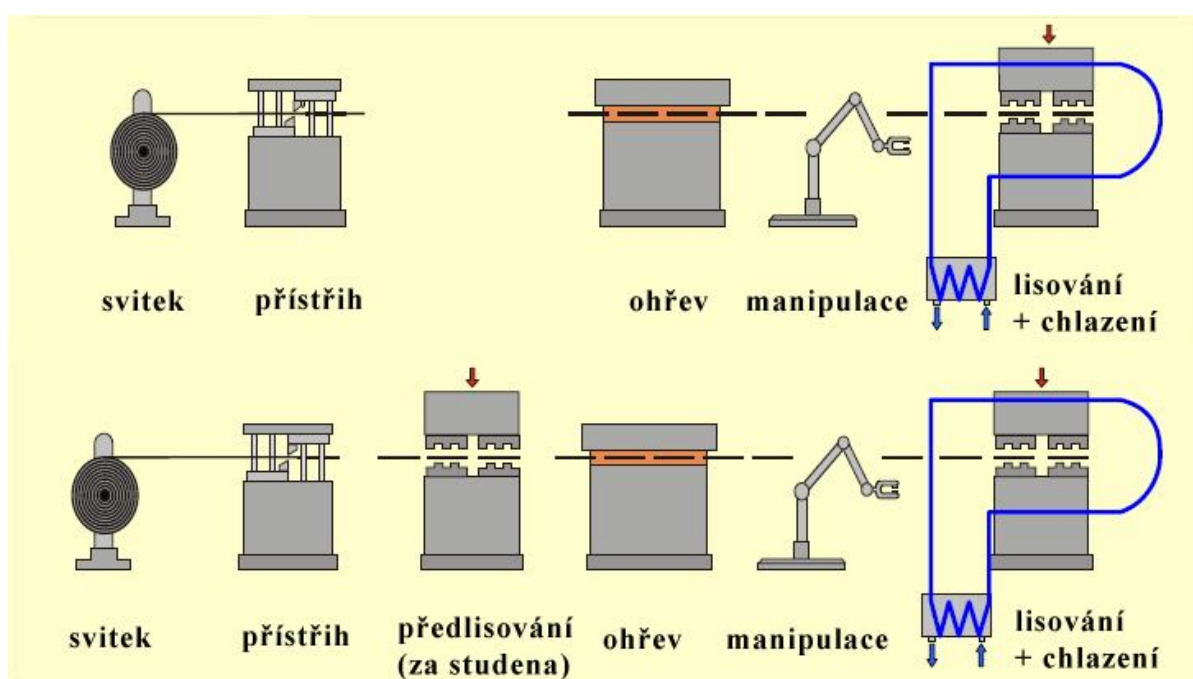
9.2.1. Termomechanické zpracování (kalení lisováním)

Ke spektru dílů vyráběných touto technologií patří především A a B sloupky, boční výztuhy ve dveřích a prazích, díly rámu, uchycení nárazníku, příčníky pro podvozek a střechu, podélné i příčné nosníky. Pro tento účel vyvinutý karosářský plech z martenzitické oceli BTR 165 nabízí dnes možnost vyrábět díly, které mají znaky hlubokotažných dílů (co se týká jejich geometrie) při současné pevnosti R_m až **1700 MPa**.

Nová technologie kalení lisováním v sobě spojuje výhodu tváření za tepla, která dovoluje vyrábět komplexní hlubokotažné díly bez většího zpětného odpružení materiálu, již známou metodou zvýšení pevnosti ocelových materiálů martenzitickou přeměnou austenitu. Při kalení se za pomoci teploty nad A_{c3} změní stávající feritická struktura na kompletní austenitickou strukturu. Následně se při kalení pomocí prudkého snížení teploty na teplotu M_s přemění austenit na martenzit. Ferit má kubickou prostorově orientovanou mřížku (bcc) a austenit kubickou plošně orientovanou mřížku (fcc). Je tedy zřejmé, že austenit má vyšší plasticitu než ferit. Ve feritu je možné rozpustit jen asi max. 0,02 % uhlíku, v austenitu maximálně 2,06 % uhlíku. Při martenzitické přeměně austenitu se změní kubická plošně orientovaná mřížka na tetragonální prostorově orientovanou mřížku. Tvoření martenzitu je ukončeno po dosažení teploty M_f . Při nové technologii kalení lisováním se před kalením tvaruje austenitická struktura a teprve tvarováním za tepla se zakalí. K tomuto vytvrzujícímu procesu dochází v uzavřeném studeném nástroji při kontaktu studeného povrchu nástroje s horkým povrchem tvarovaného dílu. Proto se nejprve v peci ohřívá plechový přístřih až do úplné austenitizace. Následně se plně austenitizovaný polotovár vloží do nástroje v lisu, uzavřením nástroje dojde nejprve ke tvarování dílu a poté při uzavřeném nástroji k jeho zušlechťení. Podmínkou pro úplnou přeměnu martenzitu přitom je, aby byla struktura dílu ochlazená tak rychle, aby byla překročena vrchní ochlazovací rychlost v_k . Zde je velikost hodnot M_{sk} a M_{fk} zásadně odvislá od obsahu uhlíku v materiálu, což platí především pro oceli s obsahem uhlíku od 0,2 do 0,4 %. V tomto rozsahu se snižují hodnoty M_{fk} s rostoucím obsahem uhlíku. Nutné zadání pro optimální tvorbu martenzitu, především teploty A_{c3} a M_s a kritická rychlost ochlazení v_k , poskytuje pro každý typ materiálu ARA diagram. Z tohoto diagramu je možné vyčíst chování přeměny austenitu a složení struktury podle změny rychlosti ochlazení.

Karosářský plech z oceli 22MnB5 se na trhu nabízí pod různými obchodními značkami – jako např.: ultraform/voestalpine, USIBOR 1500 P/Arcelor, BTR 165/Benteler, MBW/ThyssenKruppSteel. Podstatné podíly legujících prvků jsou 0,22 – 0,25 % C; 0,25 – 0,35 % Si; 1,2 – 1,4 % Mn; 0,005 % B. Nabízené tloušťky plechů jsou v rozmezí

1,5 mm až 2,5 mm. Pro ocel 22MnB5 je kritická rychlost ochlazení $v_k > 27 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, počáteční martenzitická teplota M_s cca $390 \text{ }^\circ\text{C}$, konečná martenzitická teplota M_f cca $190 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota A_{c3} cca $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Hodnoty A_{c3} se dají vypočítat také pomocí empirických vzorců, známých z literatury. V případě, že míra ochlazení je moc nízká, může dojít k tvorbě feritu, bainitu nebo perlitu ve struktuře dílu. Tyto součásti struktury snižují pevnost a tuhost dílu. Na obr. 9.6. je vidět technologický postup výroby dílu termomechanickým zpracováním, kde na horním obrázku je přímý proces (bez předdeformace za studena), na spodním obrázku je tzv. nepřímý proces, kde se před hlavní tvářecí operací za tepla realizuje podstatně menší předdeformace za studena.



Obr. 9.6. Proces termomechanického zpracování (přímý a nepřímý)

Fáze lisování za tepla je technologie závislá na teplotě a času. Probíhá v několika na sebe bezprostředně navazujících krocích. V prvním kroku se u polotovaru přemění existující feritická struktura na austenitickou strukturu, polotovaz se tedy ohřeje v peci nad teplotu A_{c3} a po určitou dobu se na této teplotě ponechá. Tato prodleva je nutná, aby došlo ke kompletní přeměně struktury na austenitickou. V průměru je tato doba od 4 do 7 minut. V druhém kroku se ohřátý polotovaz vyjme z pece a vloží se do nástroje v lisu. Pro tuto přepravu je potřeba jistá doba. V této době dojde vlivem okolního vzduchu k ochlazení. Výše tepelné ztráty je odvislá od tloušťky materiálu. Ztráty se pohybují pro materiál o síle 1,5 mm asi $20 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ a pro materiál o síle 2,5 mm asi $10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Při použití optimálního dopravního prostředku je

možné dosáhnout času od 2,5 do 3,5 vteřiny. To znamená, že se u dílu z 1,5 mm materiálu snížila teplota o 140 °C, pokud na přepravu z pece do lisu bylo potřeba 7 vteřin. Tuto teplotní ztrátu je nutné kompenzovat, aby bylo zajištěno, že polotovar má při zahájení lisování austenitizační teplotu. Proto se v praxi nastavuje pec pro ohřev na zhruba 950 °C. Tímto je teplota o cca 150 °C vyšší než teplota A_{c3} , která má 800 °C. Pokud se používají materiály bez povrchové úpravy, dochází při dopravě z pece k lisu k tvorbě okují, čemuž nelze zabránit ani při ohřevu v peci s ochrannou atmosférou. Tvorbě okují lze nicméně zabránit použitím povrchové úpravy Al-Si. Tato povrchová úprava není ochranou proti korozi, je pouze dobrým předpokladem pro následující KTL lakování lisováním zušlechtěných dílů. Tavicí teplota Al-Si povrchové úpravy je již pod 620 °C. Se stoupající teplotou však vznikají difuzní procesy, které vedou k nasycování železem. Toto vzrůstající nasycení vede k tomu, že se tavicí teplota povrchové ochrany zvedne až nad 1100 °C. Při ohřívání polotovarů z povrchově Al-Si upravených plechů je tedy nutné dbát na to, aby teplota byla stále pod tavicí teplotou povrchové úpravy, která se nastavuje podle nasycení. V dalším kroku výroby dojde k tváření s bezprostředně navazujícím zakalením ve studeném tvářecím nástroji. Aby bylo dosaženo maximální plastické tvarovatelnosti, měly by být tepelné ztráty tvarovaného dílu co nejmenší. Rychlost uzavíracího beranu by proto měla být co největší, aby nutný čas k uzavření nástroje trval pouze několik vteřin. Moderními hydraulickými lisami lze dosáhnout uzavíracích časů od 1 do 2 vteřin.

Zatímco při tváření jsou žádoucí co nejmenší přechody tepla z dílu na nástroj, po uzavření nástroje pro zakalení potřebujeme naopak co nejvyšší tepelnou výměnu mezi nástrojem a výliskem, aby se struktura tvářeného dílu ochladila tak rychle, že dojde k překročení kritické rychlosti ochlazování a vytvoření martenzitické struktury.

Během tváření zůstane nástroj tak dlouho uzavřený, až dojde k úplnému vytvoření martenzitické struktury. Toto nastane v okamžiku, když teplota dílu poklesne pod teplotu M_s , která je přibližně 190 °C. Pro zajištění skutečné přeměny veškerého austenitu na martenzit, by měl být nástroj otevřen, až když je teplota dílu 150 °C až 170 °C. Teprve v tomto okamžiku je možno díl z nástroje vyjmout.

Čas, který je nutný pro kalení v uzavřeném nástroji, rozhodujícím způsobem ovlivňuje celkový čas potřebný pro výrobu jednoho dílu. Čím je tato takzvaná doba uzávěru kratší, tím lze očekávat vyšší produktivitu a hospodárnost této technologie horkého lisování. Kratší uzavírací doby lze dosáhnout pouze vyšší mírou ochlazení. A vyšší míry ochlazení lze dosáhnout optimalizovanou konstrukcí nástroje. Tento musí mít jednak s ohledem na míru ochlazení vysokou tepelnou výměnu a na druhou stranu s ohledem na životnost a tvarovou

přesnost vysokou odolnost proti opotřebení. Dnes jsou na trhu chlazené nástroje s dosažitelným chladicím účinkem až $100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ a více. To znamená, že lze dosáhnout pomocí moderní konstrukce nástrojů časů chladicího cyklu v hodnotě několika vteřin.

Konstrukce nástroje je hlavním faktorem zodpovědným za dosažení vyššího chladicího účinku. Při konstrukci se musí zohlednit dvě podmínky. Nejprve je nutné na jeden zdvih dosáhnout maximální tvarové přesnosti a nástroj musí umožnit dostatečné ochlazení tvářeného dílu, aby bylo dosaženo požadované struktury materiálu. Aby bylo dosaženo potřebného chladicího účinku, musí být nástrojem absorbována vysoká dávka (až 100 kW) tepelné energie a poté odebrána efektivním chlazením. Tento fakt je limitujícím faktorem pro nastavený takt linky [3, 41].

10. PŘÍPRAVA VZORKŮ

Pro úspěšné a korektní provedení experimentu je nezbytně nutné zvládnout přípravu vzorků. Vlastní příprava je závislá jak na druhu zkoušky, tak i na druhu materiálu a především na samotné technologii dělení. Proto je příprava jednotlivých vzorků dále vztažena vždy ke konkrétní technologii a materiálu.

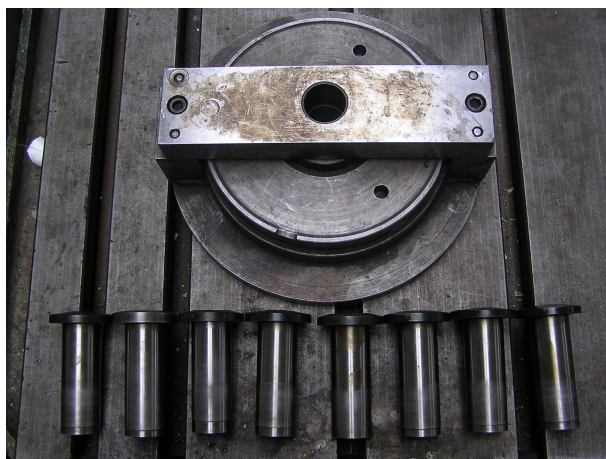
10.1. Příprava vzorků z materiálu DOCOL 1200 M

Tento materiál je výrobcem dodáván v tepelně zpracovaném stavu. Jak již bylo řečeno, materiál patří do skupiny martenzitických ocelí (tvrdost $\approx 45\text{ HRC}$), což s sebou přináší určité komplikace zejména při mechanickém způsobu dělení - stříhání. Příprava vzorků je nicméně jednodušší (oproti BTR 165) díky skutečnosti, že není potřeba materiál izotermicky kalit a zkoumat vliv dělení plechu před a po tepelném zpracování. Tím se také sníží potřebný počet vzorků.

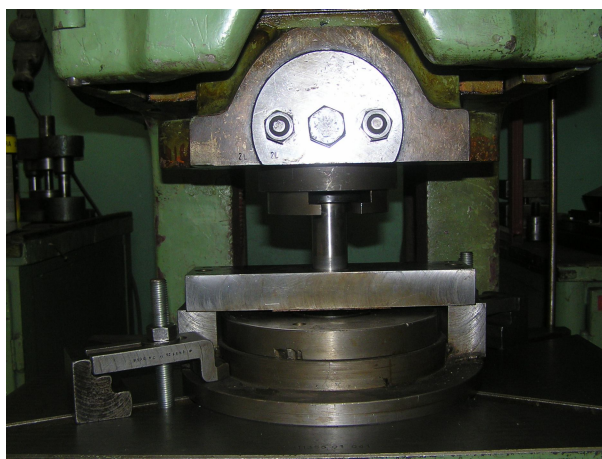
10.1.1. Příprava stříhaných vzorků

Vzhledem k vysoké pevnosti a relativně velké tloušťce plechu se zpočátku jevila tato technologie jako problematická. Při teoretických úvahách se nejprve zdálo nutné vzorky pro tuto technologii dělit tzv. sériovým stříhem (na sériovém nářadí). To se však později ukázalo s ohledem na tvarovou různorodost vzorků jako nemožné. Proto byla zvolena varianta porovnání střížných ploch od sériového stříhu s plochou vzniklou při stříhání na tabulových nůžkách NTE 2000/4 (obr. 10.2. v dílenských podmínkách školy) pro přímý stříh a s plochou vzniklou při změně střížné vůle na střížném nástroji (prostřihování otvoru pro zkoušku dle Siebela a Pompa - obr. 10.3.). Změna střížné vůle byla realizována výměnou střížníků (série výměnných střížníků na je na obr. 10.1.). Při porovnání sériové technologie s technologií

použitou v dílenských podmínkách lze konstatovat, že poměr pásma smyku a utržení je přibližně stejný, stejně jako úhel zkosení. Z tohoto důvodu byly veškeré vzorky s přímou střížnou hranou připravovány na tabulových nůžkách a vzorky pro rozšiřování otvoru byly připravovány ve střížném nástroji s výměnnými střížníky.



Obr. 10.1. Sada výměnných střížníků se střížnicí **Obr. 10.2.** Tabulové nůžky NTE 2000/4



Obr. 10.3. Střížný nástroj ve výstředníkovém lisu LEN – P 40

10.1.2. Příprava broušených vzorků

Příprava těchto vzorků (etalonů) byla podřízena požadavku, aby základní materiál nebyl tepelně ani mechanicky ovlivněn. Technologie broušení byla finální operací při výrobě této série vzorků, nicméně jako základní technologie pro výrobu polotovarů příslušných rozměrů byla použita technologie stříhání. Tato technologie samozřejmě tepelně hranu vzorku nezatěžuje, ale okolí stříhu silně deformačně zpevňuje a u martenzitických materiálů navíc dochází ke vzniku trhlin v okolí střížné hrany v důsledku vyčerpání plasticity materiálu. Takto mechanicky ovlivněná část materiálu musí být při broušení odstraněna. Po provedení

jednoduchého experimentu bylo stanoveno, že přídavek na broušení, který s rezervou zajistí odstranění předchozího vlivu stříhání představoval 1 mm.

Broušení rovinných vzorků bylo prováděno na magnetické brusce BPH 300 s chlazením. U vzorků pro rozšiřování otvoru (kde bylo potřeba brousit kruhový otvor) bylo použito nejprve třískové obrábění (soustružení) ke zvětšení předstříženého otvoru a následně použito sady brusných papírů o zrnitosti 120 až 600 k dobroušení povrchu otvoru. Drsnost povrchu byla u všech vzorků lepší než $R_a = 0,8$.

10.1.3. Příprava vzorků řezaných laserem

Pro přípravu vzorků touto technologií bylo využito laserovací centrum **Prima Evoluzione 2** (obr. 10.4.), které umožňuje tvarové řezy v prostoru s naklápěním laserovací hlavy. Samozřejmostí je pak tvorba korekcí pro dodržení konstantní vzdálenosti hlavy od řezaného povrchu, což je nutné k dosažení požadované kvality řezné hrany. Nástřihový plán byl dodán ve standardním formátu DXF. Rychlost řezání byla přibližně $4,5 \text{ m.min.}^{-1}$.



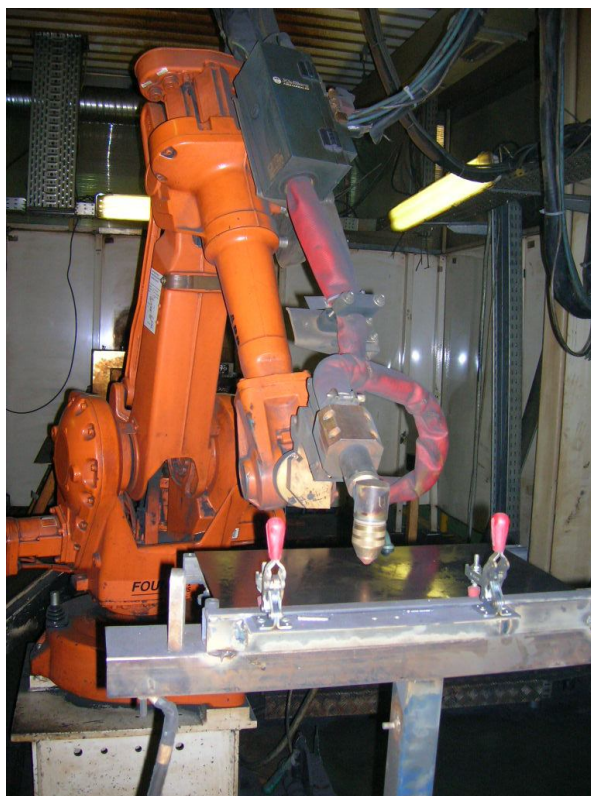
Obr. 10.4. Laserové řezací centrum Prima Evoluzione 2 (plynový laser)

10.1.4. Příprava vzorků řezaných plazmou

Příprava série vzorků pomocí této technologie byla poměrně problematická, a to hned z několika důvodů. Nešlo využít standardního formátu DXF ani DWG pro naprogramování trajektorie plazmového hořáku, ale trajektorie musela být programována ručně (prostým

objetím požadované dráhy). To bylo v praxi realizováno vytisknutím obrysu vzorku v měřítku 1:1 na papír, podložení plechem a „objetím“ tohoto obrysu byla naprogramována dráha hořáku. Tento způsob je poměrně málo přesný, nicméně tento nedostatek bylo možné eliminovat proměřením každého vzorku (u některých sérií též jeho broušením na přesný rozměr). Dalším dílčím problémem byla skutečnost, že plazmový hořák nebyl veden s korekcemi respektujícími zvlnění plechu. Materiál DOCOL 1200 M je po tepelném zpracování poměrně značně zvlněn, proto bylo nutné materiál opatřit poměrně hustou sítí otvorů, které spolu se šrouby sloužily k přitlačení plechu v celé ploše k základnímu stolu – „roštu“, čímž se významně zlepšila kvalita řezu a především přesnost.

Pro řezání bylo využito zařízení **Plasma Cutting Machine HiFocus 100** od firmy Kjellberg (obr. 10.5.) pracující s plynovou plazmou. Hořák byl vedený angulárním robotem a rychlost řezání byla přibližně $3,6 \text{ m.min.}^{-1}$.



Obr. 10.5. Angulární robot KUKA s řezacím plazmovým hořákem

10.2. Příprava vzorků z materiálu BTR 165

Počet zkoušek pro tento materiál se navýšil o sadu stříhaných vzorků připravených ještě před tepelným zpracováním. Porovnání výsledků z této série s výsledky série vzorků stříhaných až následně po tepelném zpracování bude zřejmě nejcenějším přínosem u materiálu BTR 165.

10.2.1. Příprava stříhaných vzorků před tepelným zpracováním

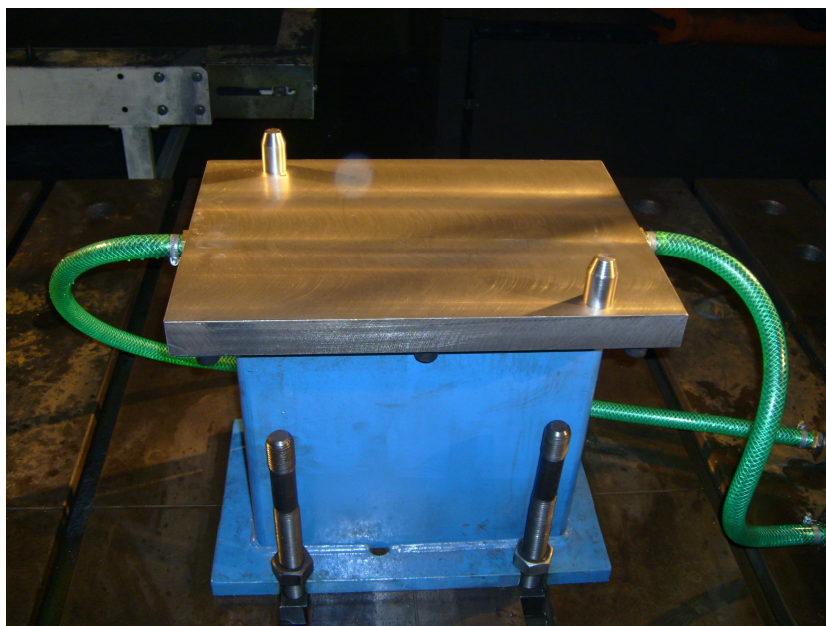
Reálné výlisky v sériové výrobě jsou nejprve ohřáty v kontinuální plynové peci na teplotu přibližně 950°C a následně pomocí manipulátoru přemístěny do nástroje, kde dojde k okamžitému odlisování spojeného s tepelným zpracováním (kalením). Aby bylo možné připravit vzorky stejným postupem (tzn. ohřev v peci, přemístění do nástroje a následné odlisování), je potřeba zajistit, aby vzorky nepropadly válečkovou tratí při ohřevu. Za tímto účelem byly vzorky navzájem propojeny pomocnými pásky ze stejného materiálu a navzájem svařeny metodou TIG (bez přídavného materiálu). Tím vznikla „mřížka“, která již byla schopna průchodu válečkovou tratí (obr. 10.6.). Po tepelném zpracování se mřížka „rozlámala“ na jednotlivé vzorky, které se dále zpravidla upravovaly (většinou broušením) dle druhu zkoušky.



Obr. 10.6. Svařené vzorky po tepelném zpracování (tryskáno, konzervováno olejem)

Všechny vzorky z tohoto materiálu byly kaleny (ať již před nebo po stříhání). Vzhledem k tomu, že reálné díly se zpracovávají termomechanicky v nástroji, je nutné respektovat tuto sériovou technologii a vzorky zpracovat stejným způsobem za stejných podmínek. Za tímto účelem byl vyroben nástroj, ve kterém bylo možné kalit rovné přístřihy. Jde o jednoduchý nástroj (v podstatě pouze 2 vodou temperované desky o rozměrech 240 x 460 mm umístěné na vhodně zkonstruovaném podstavci), upnutém na lisovací lince za kontinuální ohřívací pecí (obr. 10.7.).

Manipulace s ohřátým polotovarem, tzn. vyjmutí z válečkové tratě po ohřevu a založení do nástroje bylo provedeno ručně. Polotovar plechu byl tedy pouze zakalen bez realizace plastické deformace. Kompletní sada vzorků po tepelném zpracování je na obr. 10.8.



Obr. 10.7. Spodní díl nástroje pro termomechanické zpracování vzorků



Obr. 10.8. Sada vzorků po zakalení včetně zakalené platiny (polotovaru) pro další zpracování

10.2.2. Příprava stříhaných vzorků po tepelném zpracování

Příprava vzorků po tepelném zpracování je v podstatě shodná a přípravou vzorků z materiálu DOCOL 1200 M popsanou v předešlé kapitole. Všechny vzorky jsou připravovány příslušnou technologií z přístřihů daných velikostí činných ploch nástroje - tedy **240 x 460 mm**. Z těchto zakalených formátů jsou následně nastříhány (případně nařezány) všechny potřebné vzorky.

11. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

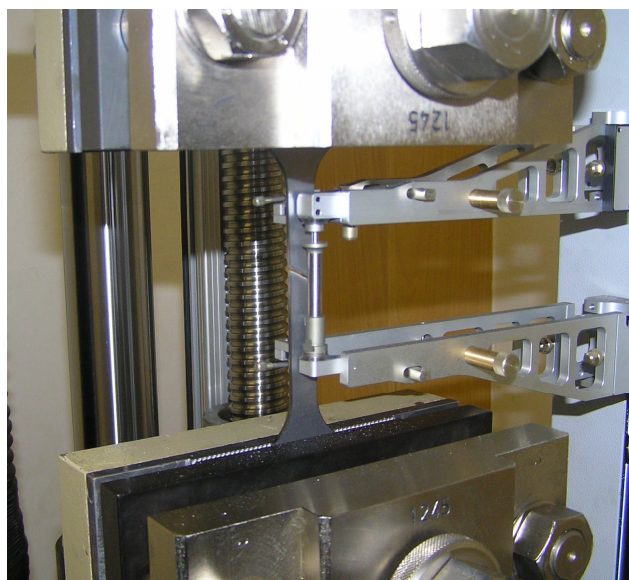
11.1. DOCOL 1200 M

11.1.1. Výsledky statické zkoušky tahem

Vzorky a průběh zkoušky odpovídají normě ČSN EN 10002-1 (**vzorky broušeny, $v = 10 \text{ mm/min}$**). Statická zkouška tahem byla realizována na zařízení **TIRAtest 2300** doplněné o průtahoměr **MFN-A** firmy Mess & Feinwerktechnik (obr. 11.1. a 11.2.). Vzhledem ke skutečnosti, že k porušení docházelo často mimo rozsah průtahoměru (téměř 2/3), do statistického vyhodnocení bylo nakonec použito **6 vzorků** pro každou sérii měření a materiál. Rozměry (tvar) zkušebních těles byly závislé na technologii přípravy. Pro technologie, které umožňují tvarový řez (laser, plazma) byly vyhotoveny včetně hlavy pro upnutí v čelistech. U technologie stříhání a broušení nebylo možné hlavu vytvořit, aniž by nevznikl vrub na přechodu střední části směrem do hlavy. Proto byly vzorky této série bez hlavy a vzorek měl konstantní průřez po celé své délce. Délka všech vzorků byla **180 mm**, šířka ve střední části byla **12,5 mm**, tloušťka dána materiálem - **2 mm**. Hodnota šířky vzorku ve střední části byla pouze orientační hodnota, kterou nebylo možno vždy dodržet (zejména u technologie stříhání a řezání plazmou). Z tohoto důvodu byla šířka vzorku ve střední části důkladně proměřena (a to i z hlediska tloušťky). Tyto hodnoty sloužily jako vstupní údaje pro nastavení definice měření v programu **LaNET v.4**.



Obr. 11.1. Zařízení TIRAtest 2300



Obr. 11.2. Detail zkušebního tělesa s průtahoměrem MFN-A po dosažení mezního stavu

Tab. 11.1. Mechanické hodnoty v jednotlivých směrech – střední hodnoty ze 6 měření (broušeno)

t = 2 mm	DOCOL 1200 M – BROUŠENO					
	\bar{X}_{0°	s	\bar{X}_{45°	s	\bar{X}_{90°	s
$R_{p0,2}$ [MPa]	1127,77	6,25	1139,03	19,75	1134,44	11,39
R_m [MPa]	1290,92	8,29	1278,14	13,89	1284,03	10,47
A_{50mm} [%]	7,83	0,26	7,34	0,29	6,48	0,29
A_g [%]	3,35	0,22	2,70	0,38	2,50	0,41
KUT [-]	0,068	0,002	0,065	0,004	0,057	0,003

Tab. 11.2. Mechanické hodnoty ve směru 0° - střední hodnoty ze 6 měření (stříháno)

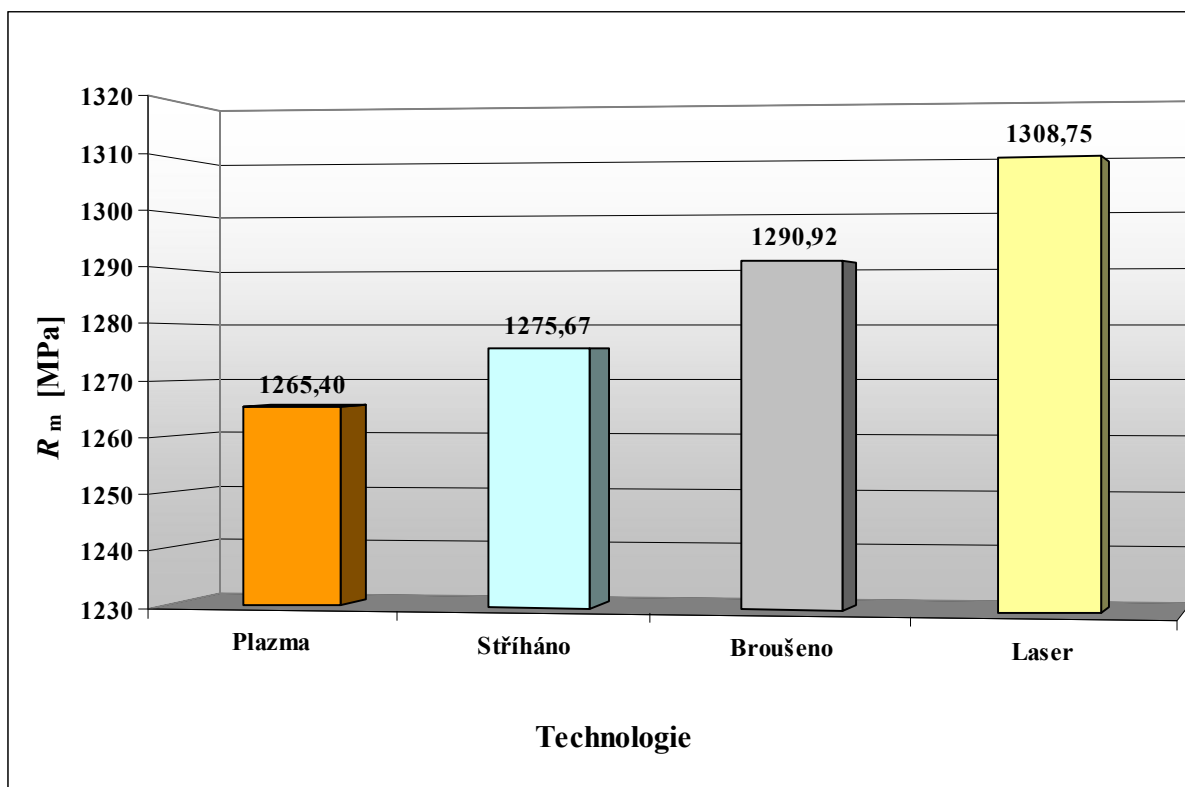
DOCOL 1200 M - STŘÍHÁNO					
t = 2 mm	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50mm} [%]	A_g [%]	KUT [-]
\bar{X}_{0°	1102,41	1275,67	6,32	2,98	0,055
s	17,21	14,52	0,39	0,20	0,005

Tab. 11.3. Mechanické hodnoty ve směru 0° - střední hodnoty ze 6 měření (laser)

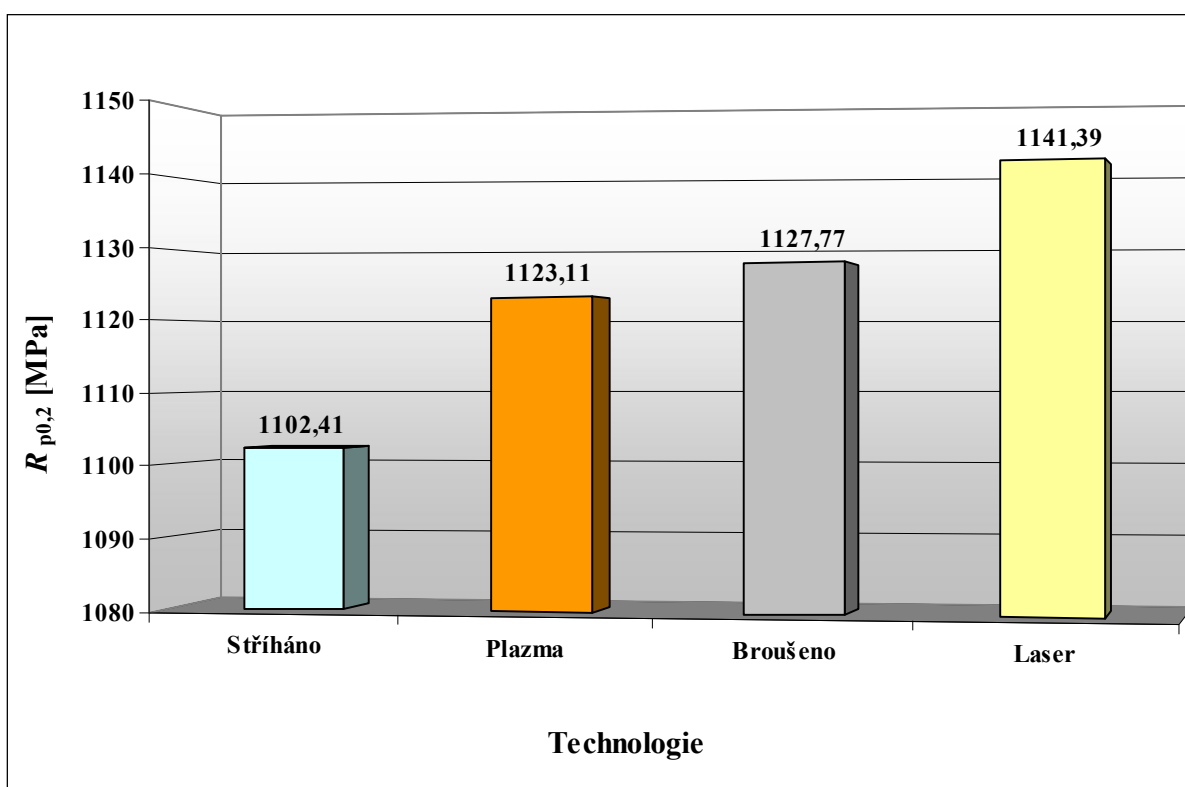
DOCOL 1200 M - LASER					
t = 2 mm	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50mm} [%]	A_g [%]	KUT [-]
\bar{X}_{0°	1141,39	1308,75	7,58	3,25	0,066
s	17,06	13,04	0,26	0,13	0,003

Tab. 11.4. Mechanické hodnoty ve směru 0° - střední hodnoty ze 6 měření (plazma)

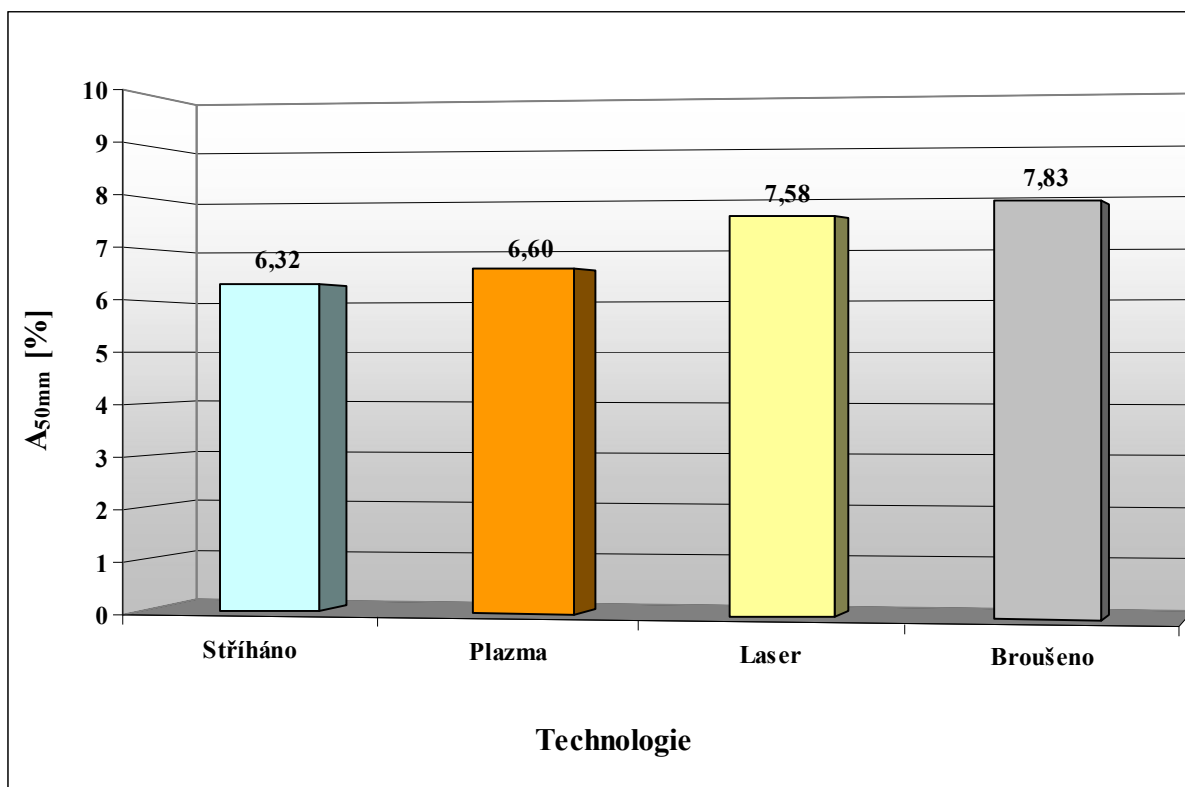
DOCOL 1200 M - PLAZMA					
t = 2 mm	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50mm} [%]	A_g [%]	KUT [-]
\bar{X}_{0°	1123,11	1265,40	6,60	2,56	0,059
s	16,43	9,10	0,20	0,04	0,004



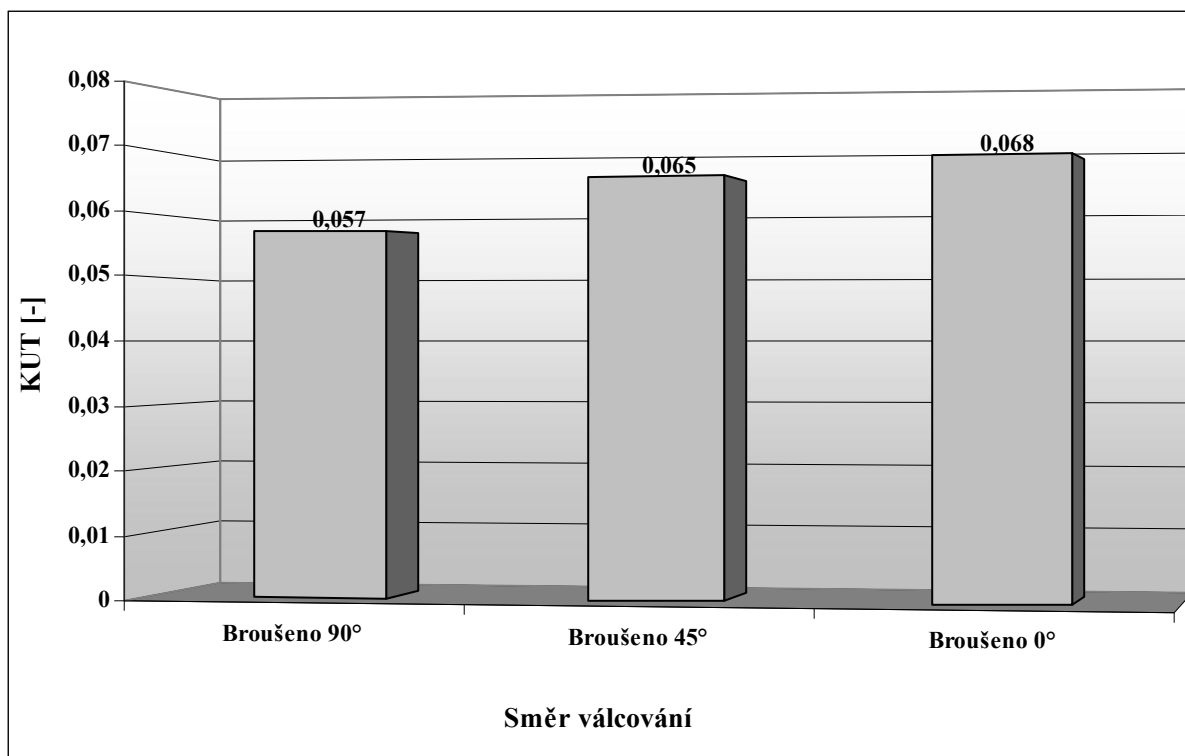
Obr. 11.3. DOCOL 1200 M - Závislost meze pevnosti R_m na technologii přípravy



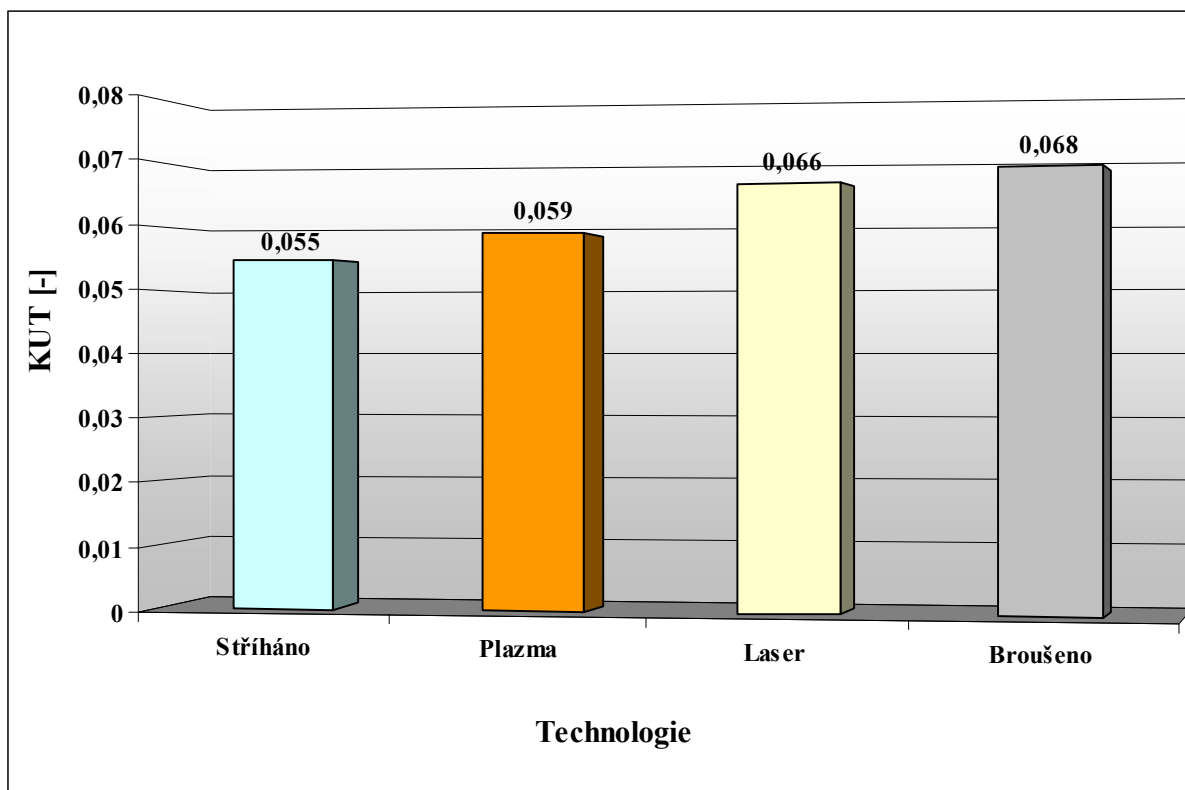
Obr. 11.4. DOCOL 1200 M - Závislost smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na technologii přípravy



Obr. 11.5. DOCOL 1200 M - Závislost tažnosti A_{50mm} na technologii přípravy



Obr. 11.6. DOCOL 1200 M – Závislost KUT na směru válcování



Obr. 11.7. DOCOL 1200 M - Závislost **KUT** na technologii přípravy

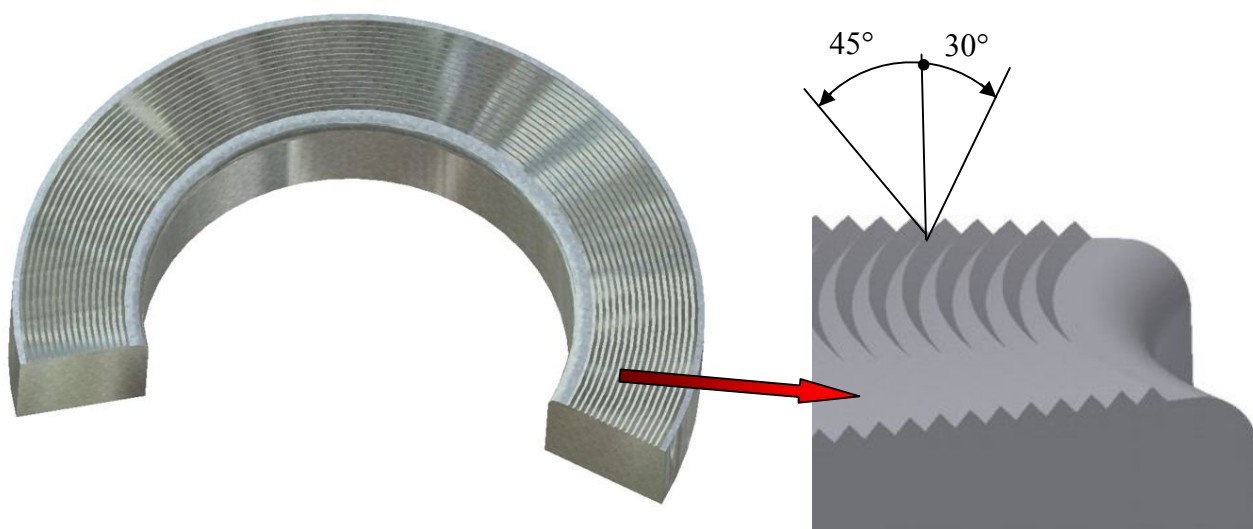
11.1.2. Výsledky zkoušky rozšiřováním otvoru



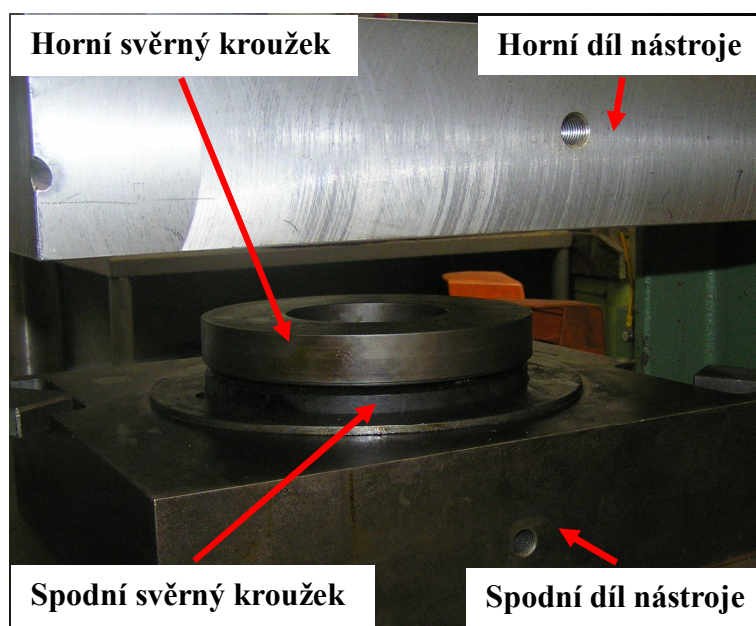
Zkouška rozšiřováním otvoru probíhala na dvojčinném hydraulickém lisu **CBA 300/63** (obr. 11.8.) doplněném o nástroj pro rozšiřování otvoru válcovým tažníkem o průměru 80 mm. Výchozí průměr rondelu byl **210 mm**, průměr rozšiřovaného otvoru **35 mm**, tloušťka vzorků dána materiálem - **2 mm**. Horní díl nástroje je upevněn na beranu lisu a slouží spolu se svěrnými kroužky (opatřeny soustřednými drážkami proti prokluzu - obr. 11.9.) k sevření rondelu. Válcový tažník je ovládán spodní pístnicí a pohybuje se rychlostí **90 mm/min** až po dosažení mezního stavu (vzniku první obvodové trhliny). Tato zkouška byla značně náročná na spotřebu materiálu, proto (jako v případě statické zkoušky tahem) bylo do statistického hodnocení použito **6 vzorků**.

Obr. 11.8. Lis CBA 300/63

Uspořádání nástroje při zkoušce je na obr. 11.10.



Obr. 11.9. Detail části svěrného kroužku s rastrem



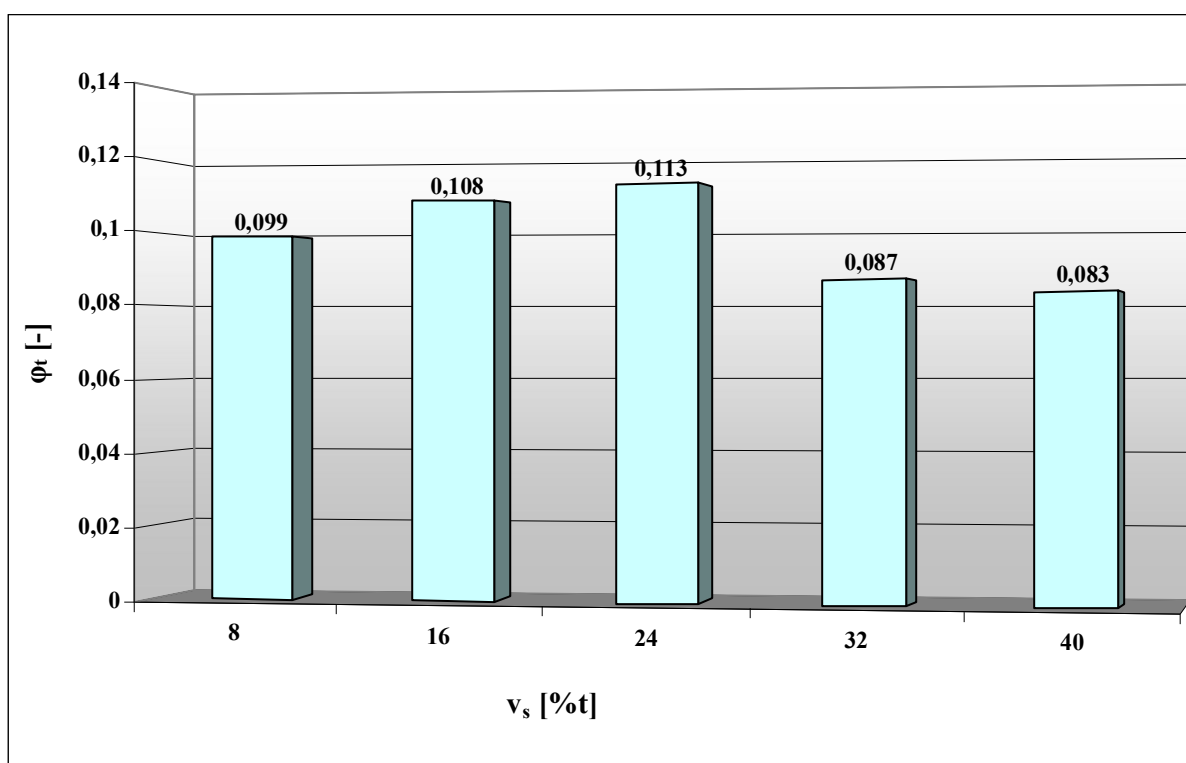
Obr. 11.10. Schéma uspořádání nástroje při rozšiřování otvoru

Součástí zkoušky rozšiřováním otvoru bylo také zjištění vlivu střížné vůle na velikost tangenciální deformace. Pro stanovení této závislosti bylo použito sady výměnných střížníků, kde velikost střížné vůle byla **8, 16, 24, 32 a 40 % tloušťky stříhaného materiálu**. Vypočtené hodnoty tangenciální deformace v závislosti na střížné vůli udává tab. 11.5. Velikosti dosažených tangenciálních deformací v závislosti na technologii zhotovení otvoru udává tab. 11.6. Vzhledem k tomu, že vzhled střížné hrany se výrazně měnil pouze u největší a nejmenší střížné vůle, jsou na obr. 11.15 a 11.17. zachyceny pouze řezy s vůlí 8 a 40%

tloušťky. Pro porovnání doplněno o fotografie vzorku stříhaného s vůlí 24% tloušťky materiálu (obr. 11.16.).

Tab. 11.5. Tangenciální deformace v závislosti na střížné vůli - střední hodnoty ze 6 měření

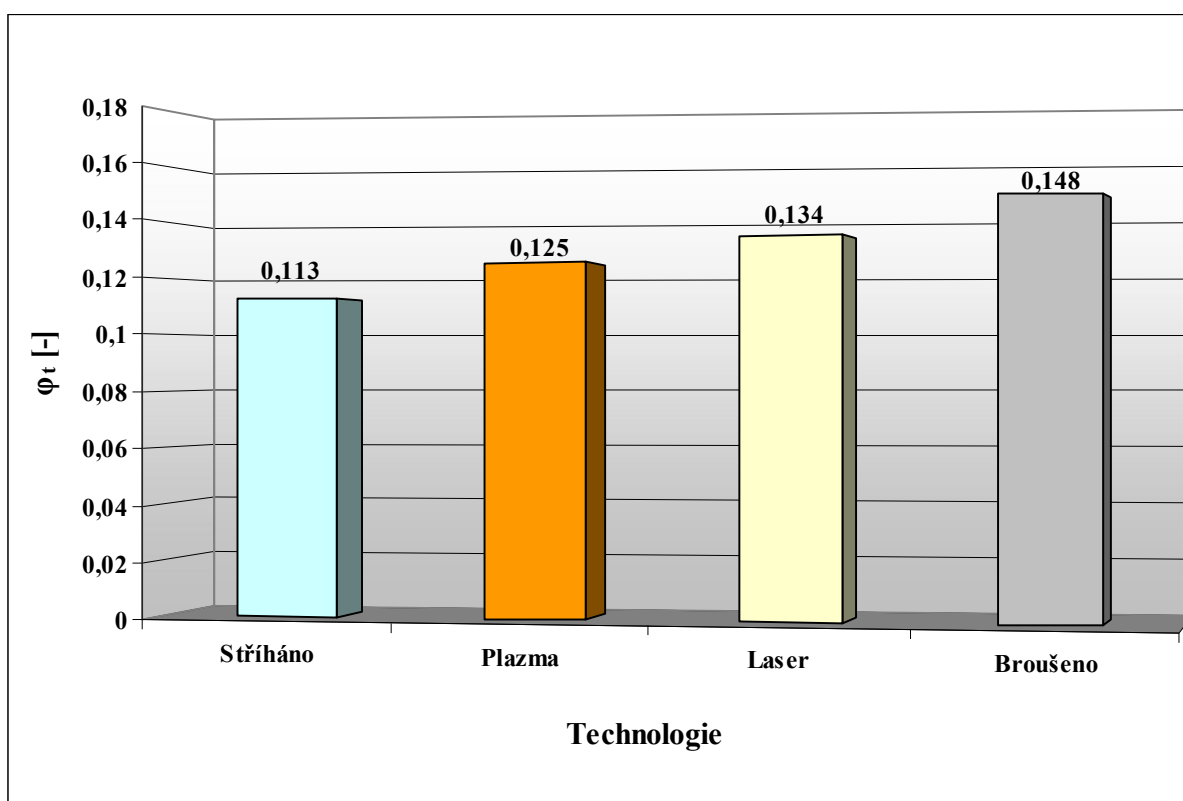
Rozšiřování otvoru, stříháno s různou vůlí - DOCOL 1200 M		
STŘÍŽNÁ VŮLE v_s [%] t	$\bar{x} \varphi_t$ [-]	s
8	0,099	0,015
16	0,108	0,009
24	0,113	0,007
32	0,087	0,013
40	0,083	0,006



Obr. 11.11. DOCOL 1200 M - závislost tangenciální deformace φ_t na střížné vůli v_s

Tab. 11.6. Tang. deformace v závislosti na technologii dělení - střední hodnoty ze 6 měření

Rozšiřování otvoru – DOCOL 1200 M		
TECHNOLOGIE	\bar{x}_{φ_t} [-]	s
Broušeno	0,148	0,004
Stříháno – $v_s = 24\% t$	0,113	0,007
Laser	0,134	0,014
Plazma	0,125	0,009

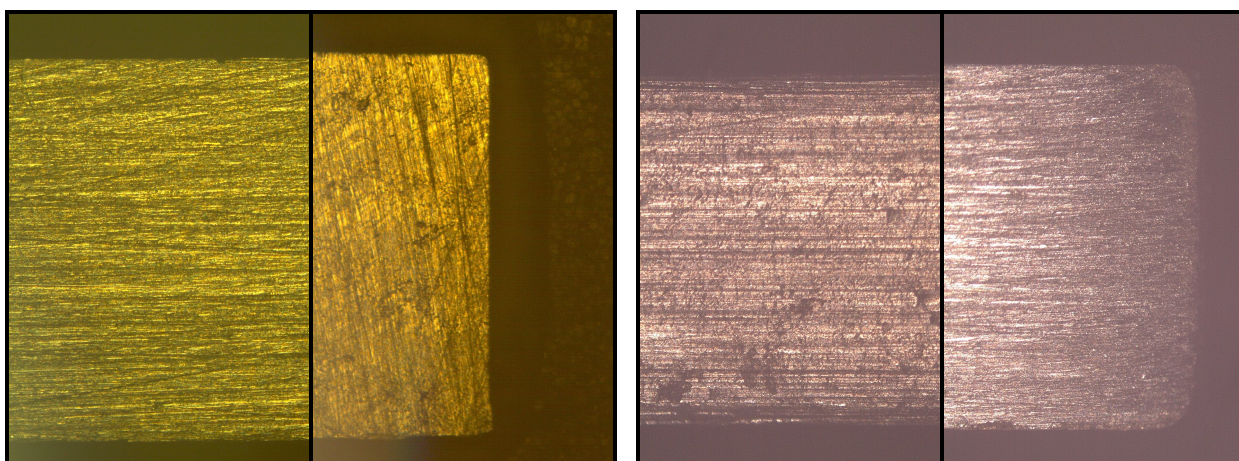


Obr. 11.12. DOCOL 1200 M - závislost tangenciální deformace φ_t na technologii přípravy

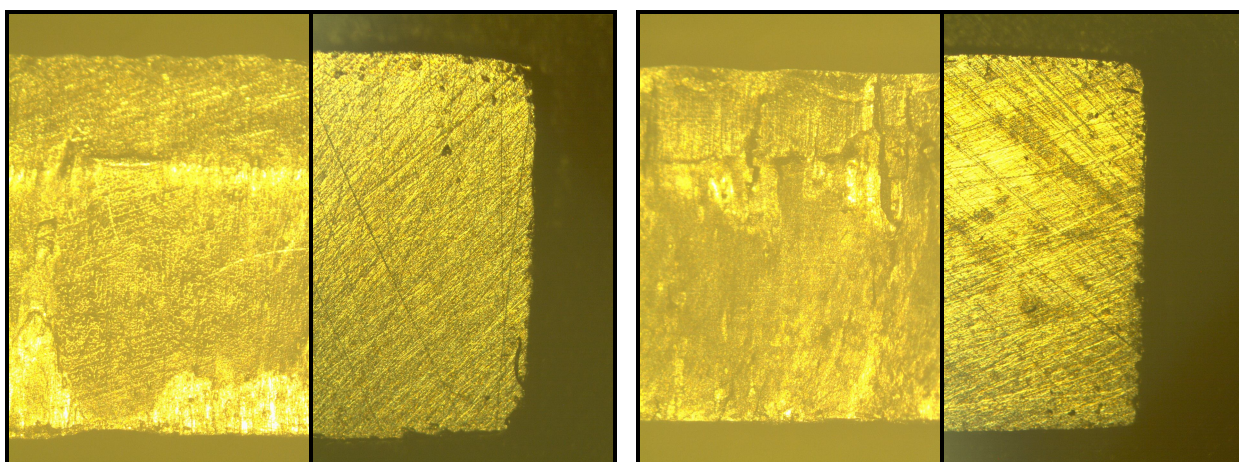
Pro lepší představu o charakteru hrany byly zhotoveny fotografie nárysu a bokorysu hrany od každé technologie dělení. Fotografie jsou seřazeny tak, že dvojice fotografií **vlevo** zachycuje nárys a bokorys **před deformací**, dvojice **vpravo** potom nárys a bokorys **po deformaci**. Vzorky před deformací byly odebrány pro snazší fotografování z rovných částí vzorků, vzorky focené po deformaci byly odebrány (ve snaze zachytit hranu s pokud možno co nejrovnoměrnejší deformací) ze vzorků pro zkoušku rozšiřováním otvoru. Fotografování probíhalo na zařízení **LEICA DM2500P** s objektivem **DFC 290** v prostředí programu **InfraView**. Uspořádání pracoviště je na obr. 11.13.



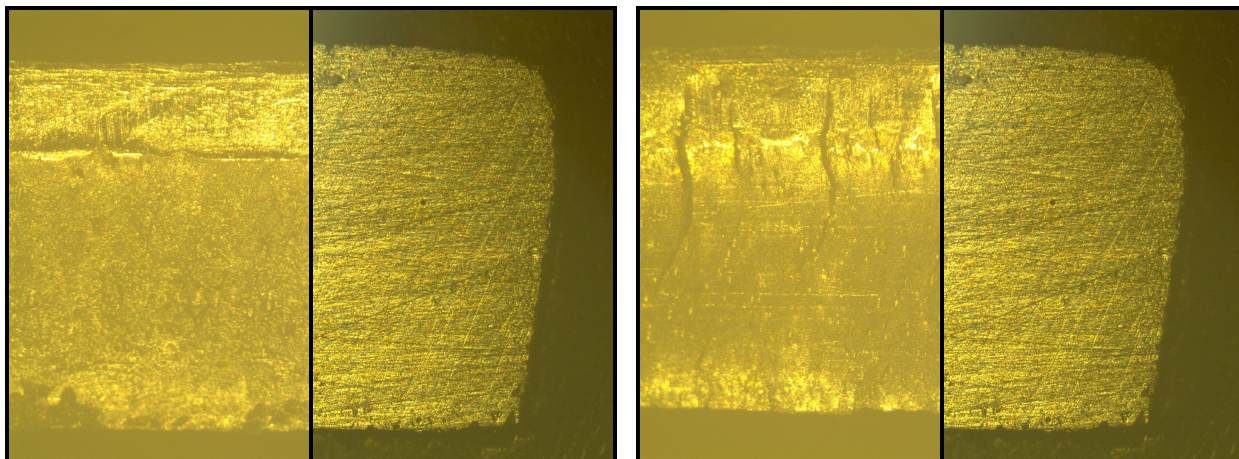
Obr. 11.13. Uspořádání pracoviště pro optickou mikroskopii



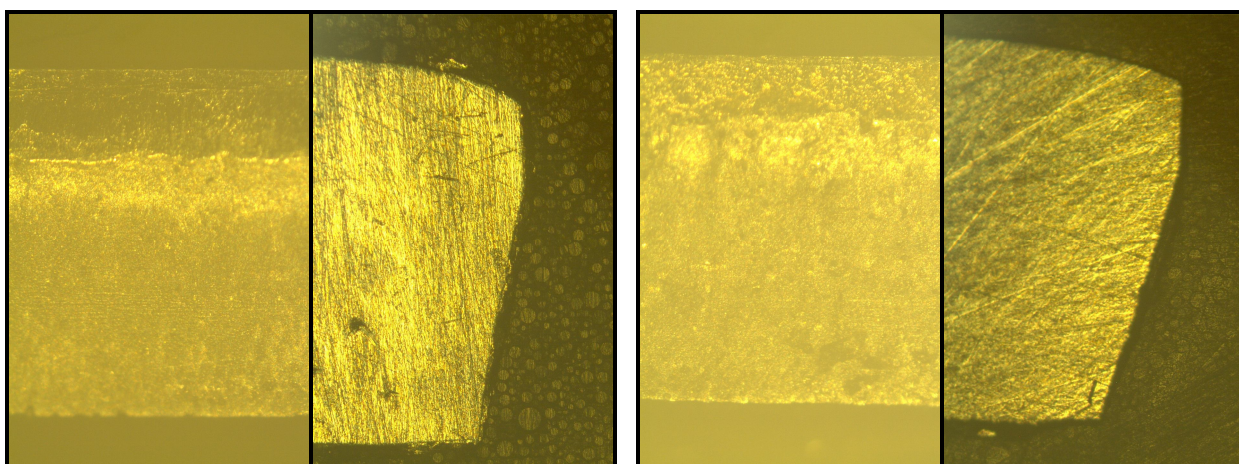
Obr. 11.14. DOCOL 1200 M - broušeno, zvětšeno 25x



Obr.11.15. DOCOL 1200 M - stříháno ($v = 8\%$ t), zvětšeno 25x

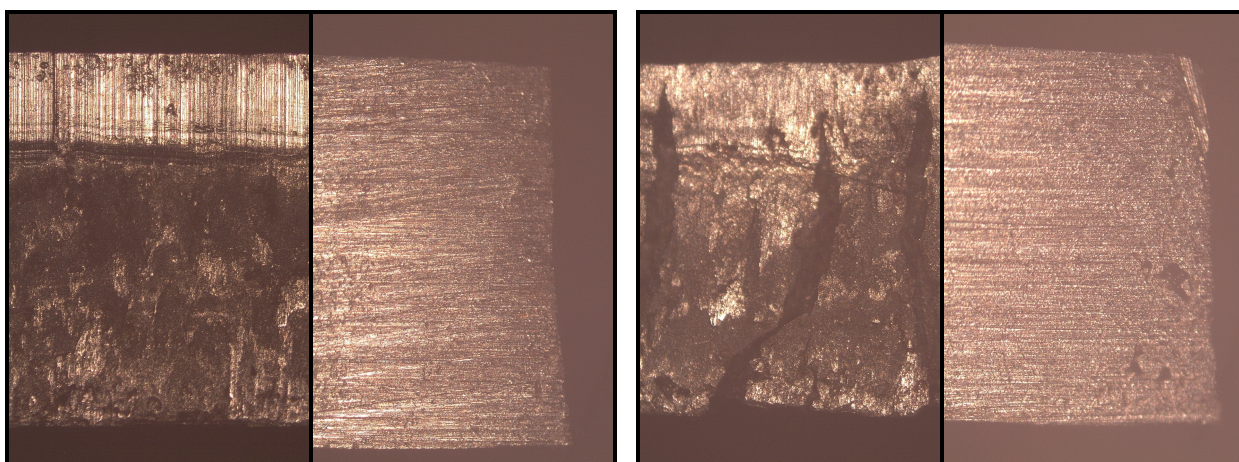


Obr. 11.16. DOCOL 1200 M - stříháno ($v = 24\%t$), zvětšeno 25x

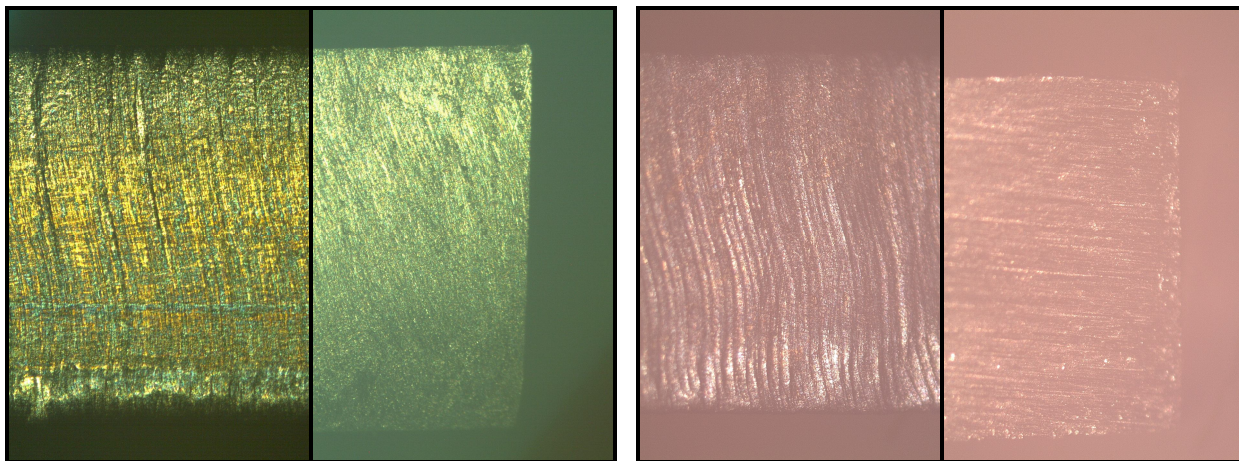


Obr. 11.17. DOCOL 1200 M - stříháno ($v = 40\%t$), zvětšeno 25x

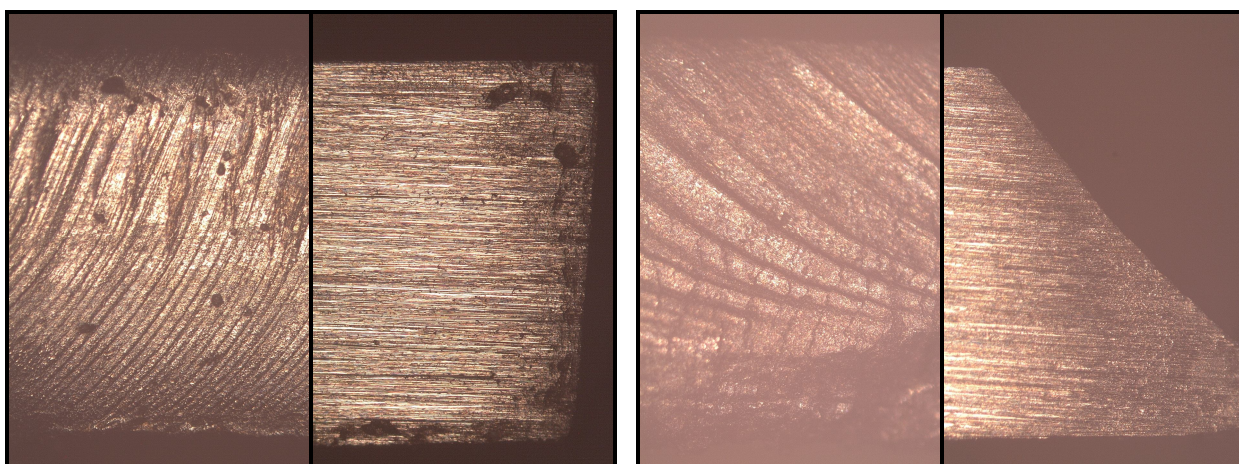
Pozn: vznik trhlin při zkoušce rozšiřováním otvoru nezávisí na směru válcování (svědčí o izotropním chování materiálu)



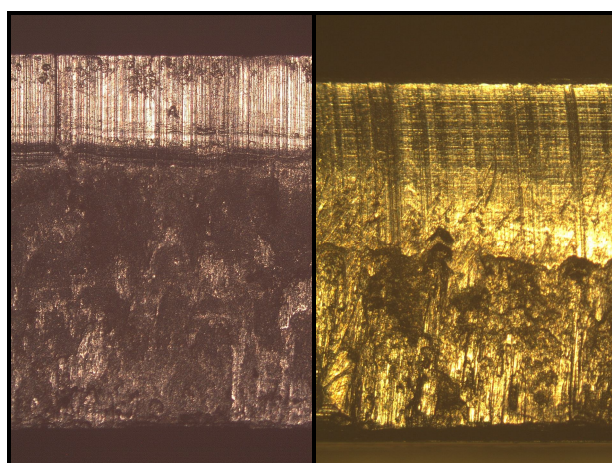
Obr. 11.18. DOCOL 1200 M - stříháno - tabulové nůžky, zvětšeno 25x



Obr. 11.19. DOCOL 1200 M - laser, zvětšeno 25x

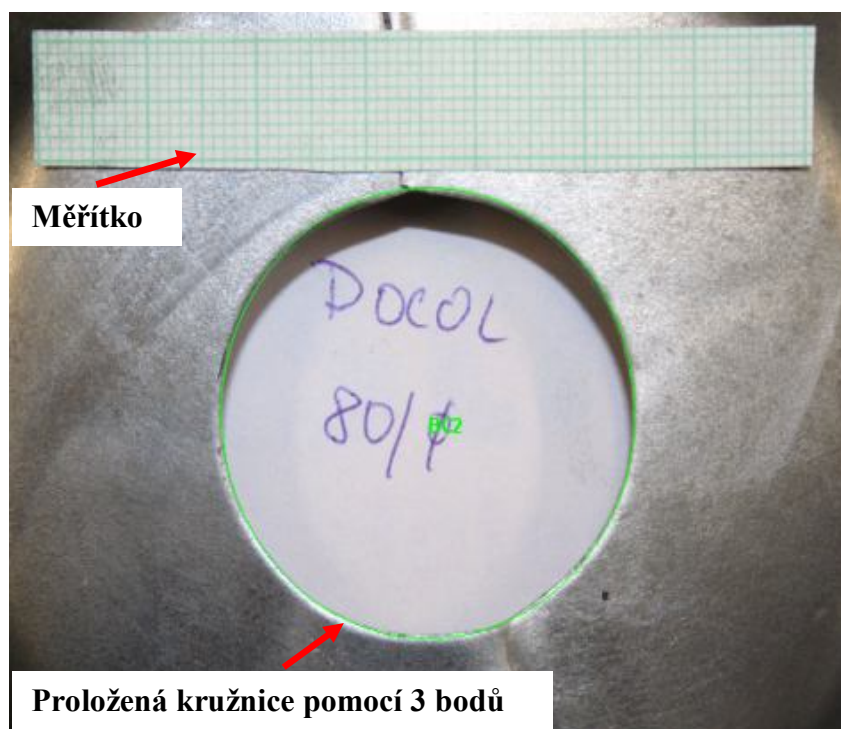


Obr. 11.20. DOCOL 1200 M - plazma, zvětšeno 25x



Obr. 11.21. DOCOL 1200 M, vlevo – stříháno na tabulových nůžkách, vpravo – děleno sériovým stříhem, zvětšeno 25x

Zkouška rozšiřováním otvoru dle Siebela a Pompa je v principu velmi jednoduchá, ale její přesnost je výrazně závislá na přesnosti měření jak původního otvoru (d_0), tak především konečného průměru (d). Původní průměr je závislý na způsobu jeho vyhotovení, ale v podstatě se dá považovat za ideálně kruhovitý, protože je tvořen stříháním ve střižném nástroji nebo řezán pomocí CNC laseru nebo plazmy. Jeho velikost lze stanovit prostým změřením dostatečně přesným měřidlem (v tomto případě digitální posuvné měřidlo). Po dosažení mezního stavu (vzniku trhliny na obvodu otvoru) je původně ideálně kruhový otvor přetvořen na otvor s průměrem d , který ovšem ideálně kruhovitý není. Odchyšky v kruhovitosti jsou způsobeny anizotropií materiálu. Testované materiály se svým chováním blíží takřka izotropnímu materiálu, proto ani odchyšky v kruhovitosti nejsou příliš velké. Pro stanovení konečného průměru byl využit software **Image-Pro Plus**. V první fázi měření je nutné zhotovit fotografický snímek rondelu s otvorem po dosažení mezního stavu, kde je v záběru v rovině otvoru umístěno vhodné měřítko pro kalibraci (v tomto případě milimetrový papír) - viz obr. 11.22. V prostředí programu je poté provedena kalibrace a následně proložení tvaru otvoru kružnicí pomocí tří bodů nebo kruhových úseků (v případě, že je obvod zasažen trhlinou, která zůstane i po odlehčení „rozevřena“). Odchyšky v kruhovitosti otvoru se tak dají poměrně jednoduše eliminovat.



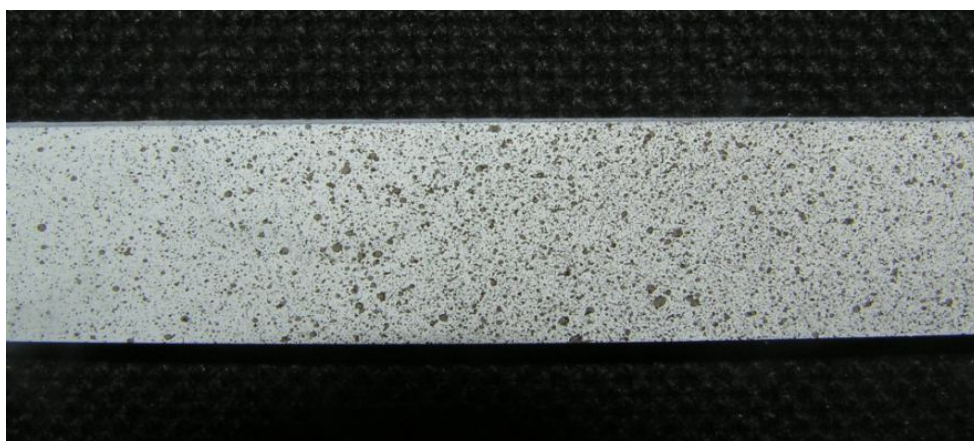
Obr. 11.22. Princip měření průměru otvoru pomocí programu **Image-Pro Plus**

11.1.3. Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem

Pro snímání průběhu zkoušky byl použit bezkontaktní optický systém **ARAMIS v6.1.1-2** německé firmy **GOM**. Systém umožňuje v reálném čase sledovat průběh deformace a umožňuje například predikovat kritické místo, kde dojde ke vzniku trhliny nebo určit mechanismus plastické deformace. Výsledkem je barevná mapa rozložení deformací na objektu zatěžovaném buď staticky nebo dynamicky.

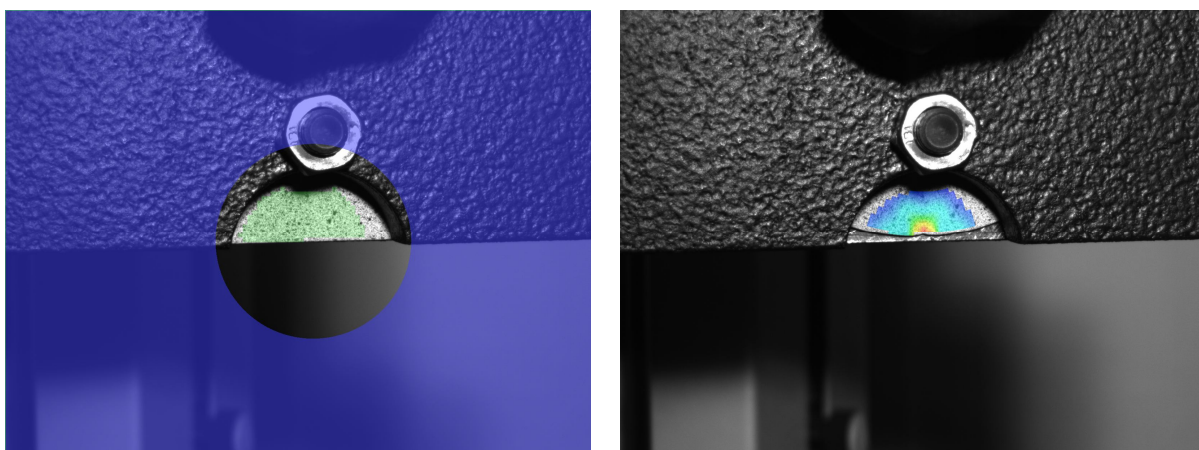
Systém **ARAMIS** využívá k měření deformace materiálu snímání daného vzorku pomocí dvou kamer. Před samotným měřením musí dojít ke kalibraci těchto kamer, což posléze umožní relevantní měření deformace v určitém kalibračním objemu. Velikost tohoto prostoru záleží na použité kalibrační destičce obsahující kalibrační body o předem daných souřadnicích, které kalibrované kamery zachytí z různých úhlů snímání. Při vlastním měření je tedy nezbytné pohybovat se vždy v tomto kalibračním objemu.

Systém tvoří dvojice kamer ke snímání měřeného vzorku, osvětlovací zařízení o výkonu 2000 W, T-box (Trigger) pro řízení frekvence snímání a PC pro vyhodnocování zkoušek. Na vlastní měřený vzorek je potřeba nanést stochastický vzor (pattern) - obr. 11.23. Systém pomocí tohoto vzoru přiřadí každému bodu charakteristické číslo (odstín šedi) a nanese vlastní síť. Měření deformace probíhá snímáním posunu těchto bodů a deformace sítě.



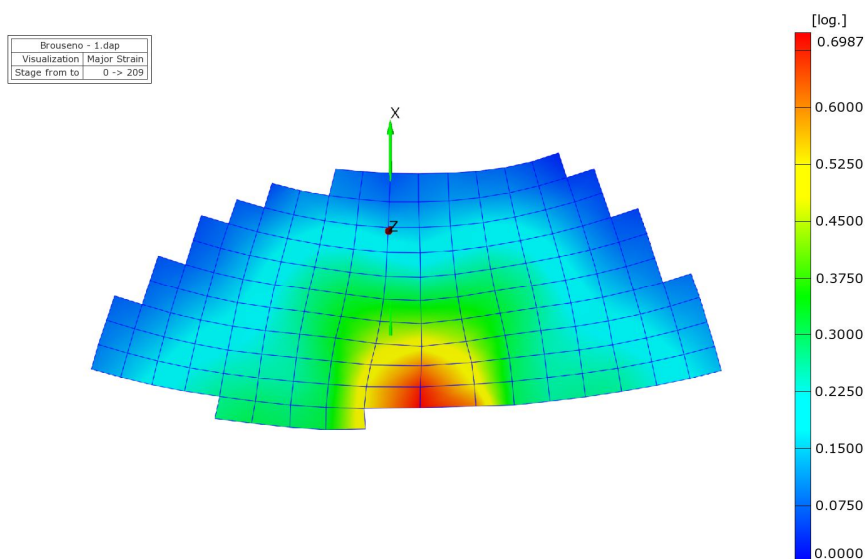
Obr. 11.23. Stochastická síť (pattern) na vzorku pro tříbodový ohyb

Vlastní měření probíhalo po založení vzorku opatřeného patternem do přípravku pro tříbodový ohyb. Po jeho ustavení byl pořízen jeden snímek z důvodu kontroly kvality pokrytí vzorku sítí vytvořenou systémem ARAMIS. Na obr. 11.24. (vlevo) je vidět fotografie z levé kamery, kde již byla vybrána tzv. maska sítě (zelená oblast), což je vlastní měřená oblast. Na obr. 11.24. (vpravo) je napětěová mapa po dosažení mezního stavu.



Obr. 11.24. DOCOL 1200 M - snímek z levé a pravé kamery
(vlevo počáteční, vpravo konečný stav) - laser, vzorek č. 4

Příprava vzorků před vlastním měřením spočívá v odmaštění vzorku (případně měřené součásti) a nanesení nejprve bílého podkladu a následně černého kontrastního nástřiku, který vytvoří pattern. Tento pattern se deformuje společně s měřeným objektem a pro každou úroveň zatížení (tzv. stage) je sejmut dvěma kamerami s CCD čipem. Ze snímků jsou pomocí image processingu vypočteny 3D souřadnice bodů ležících na povrchu objektu. Porovnáním odpovídajících si bodů v jednotlivých úrovních zatížení systém vypočítá 3D posuvy a následně tvar deformovaného objektu a deformace.



Obr. 11.25. DOCOL 1200 M - grafický výstup zkoušky třibodovým ohybem – broušeno,
vzorek č.1

Mezi nesporné výhody tohoto systému patří velký měřicí rozsah jak z hlediska velikosti snímaného objektu (vzorku), tak z hlediska velikosti deformace. Dále je to jednoduchá příprava vzorků, kde pattern může být zcela stochastický i deterministický. Hustota naměřených dat je velmi vysoká a vychází ze zvoleného kalibračního objemu a použité masky sítě. Systém je vysoce mobilní (lze ho přepravovat v osobním automobilu) a lze ho instalovat téměř kdekoli. Systém je vysoce flexibilní což znamená, že lze snadno měnit velikost záběru a rozlišitelnost systému. Výstupem je přehledná grafická vizualizace v podobě barevných map, umožňuje tvořit různé řezy materiálem, vizualizovat průběh deformace ve vybraných snímcích a exportovat naměřená data - (obr. 11.25.)

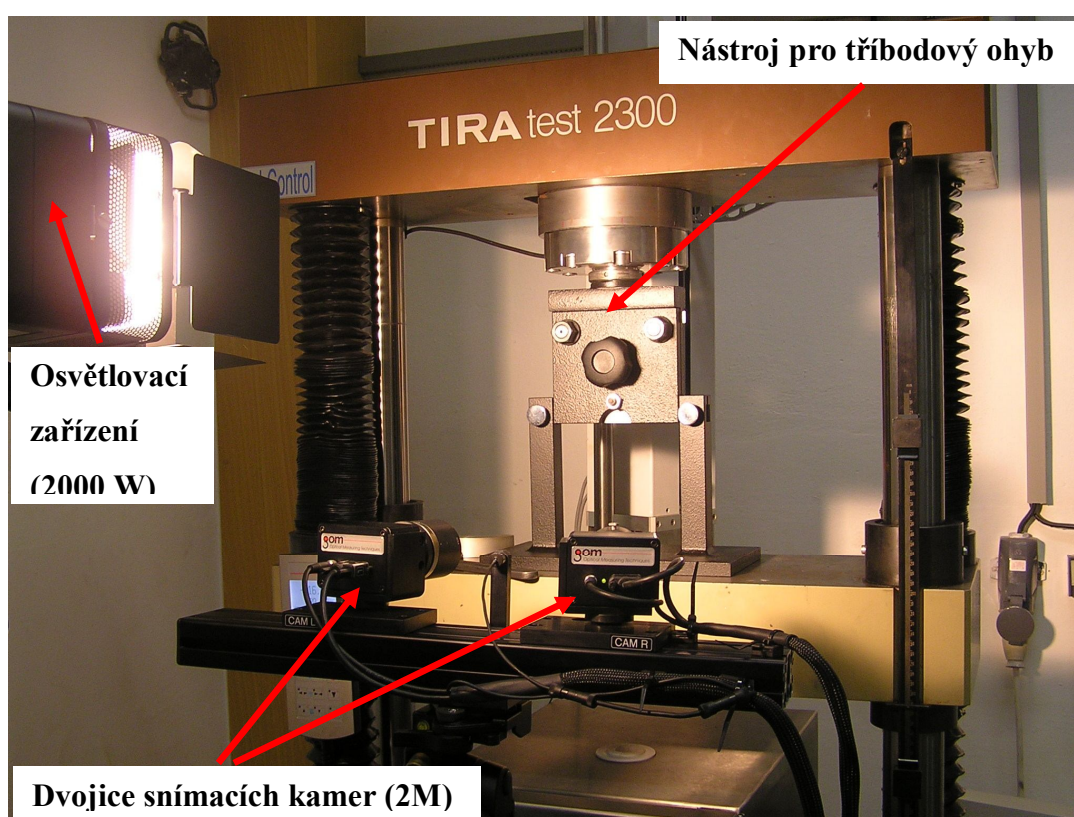
Systém umožňuje následující výstupy měření:

- Hodnoty 3D posunutí bodů na povrchu objektu.
- Hodnoty 3D posunutí bodů v radiálním směru.
- Hodnoty 3D deformace měřené na povrchu objektu (Mises, Tresca strain).
- Hodnoty hlavních a vedlejších deformací (Major, Minor strain).
- Tvar objektu v jednotlivých fázích deformace.
- Hodnoty změny tloušťky materiálů (např. u plechů).
- Velikost deformace vůči limitní tvářecí křivce (FLC).
- Grafické nebo tabulkové výstupy naměřených hodnot.

Je zřejmé, že oblasti využití tohoto systému jsou velmi široké a uplatní se nejen při dimenzování součástí a materiálových zkouškách, ale i při testování nových materiálů, výpočtech stability, zkoumání materiálů v nelineárních oblastech deformace, optimalizace procesu tváření (limitní FLC křivka), zjišťování materiálových vlastností, charakteristikách procesu tečení nebo procesech stárnutí. Mezi nejdůležitější aspekty měření pomocí systému ARAMIS patří skutečnost, že se nejedná o pouhé přiblížení skutečnosti (jako v případě metody konečných prvků), ale o měření reálných deformací na zkoumaném dílu (vzorku).

Zkouška tříbodovým ohybem probíhala na stejném zařízení, jako statická zkouška tahem (**TIRAtest 2300**) při rychlosti posuvu příčnicku **20 mm/min**. Nastavená frekvence snímkování systému **ARAMIS** byla volena tak, aby v konečné fázi (v čase, kdy dojde k dosažení mezního stavu vzorku) byla frekvence snímkování maximální (systém umožňuje maximálně **6 snímků za sekundu**). Zvolený interval snímkování s touto maximální hodnotou

byl volen na základě zkušební vzorku. V počáteční fázi byla frekvence snímání 1 snímek za sekundu. Toto opatření bylo provedeno z důvodu úspory času výpočtu a z kapacitních důvodů (počet snímků v rámci jednoho měření je limitován). **Maximální velikost deformace byla odečtena z posledního snímku před vznikem trhliny.** Díky značné náročnosti vlastního měření byly u této zkoušky měřeny namísto 6 pouze **3 vzorky**. Rozměr vzorků pro zkoušku třibodovým ohybem byl **220x20 mm**, tloušťka **2 mm**. Uspořádání pracoviště při zkoušce je na obr. 11.26., detail vzorku po dosažení mezního stavu je na obr. 11.27. Rozdíl v úhlu ohybu broušeného s stříhaného vzorku je dobře patrný z obr. 11.28. [42].



Obr. 11.26. Uspořádání pracoviště při zkoušce třibodovým ohybem



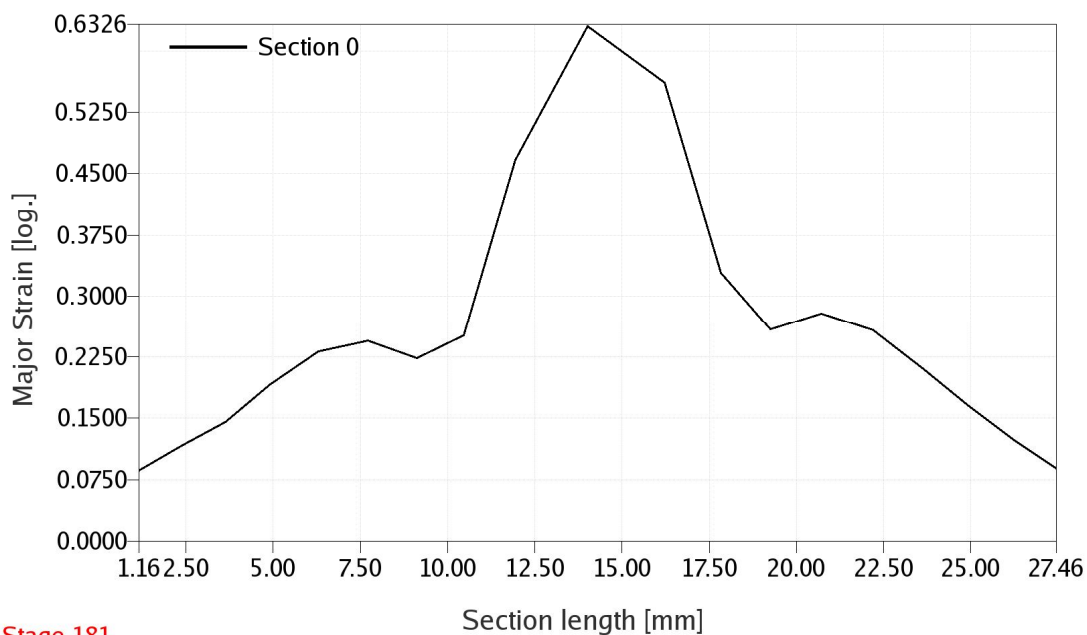
Obr. 11.27. Detail trhliny (DOCOL 1200 M, broušeno)



Obr. 11.28. DOCOL 1200 M - rozdíl v úhlu ohybu vzorku řezaného laserem a stříhaného vzorku po dosažení mezního stavu

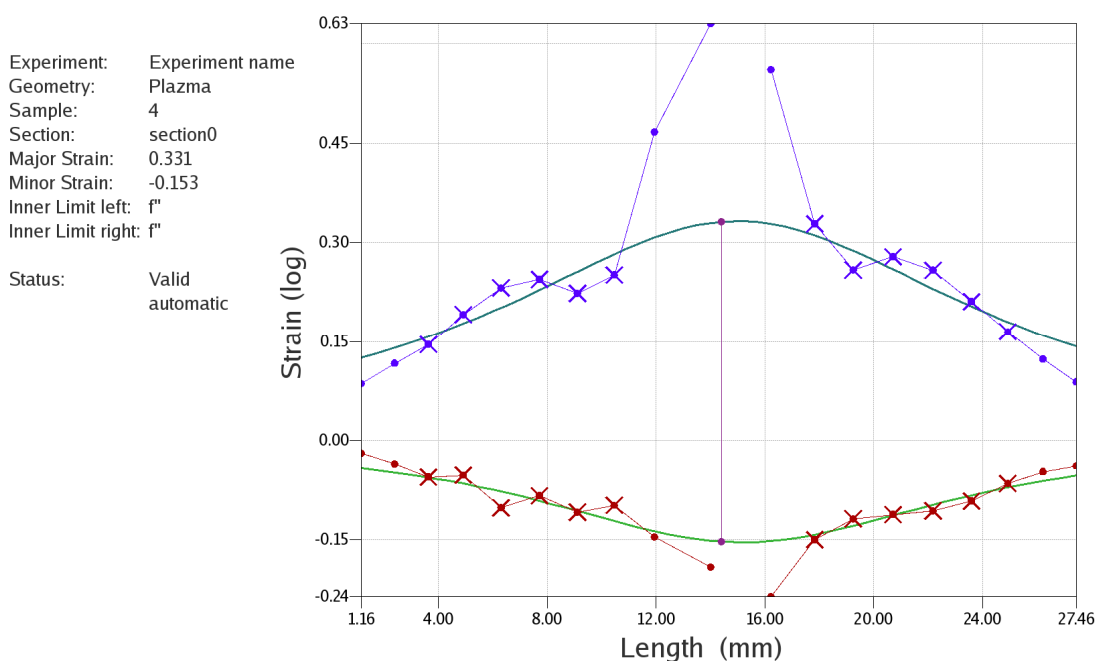
Při namáhání vzorku ohybem je deformace zprvu homogenní a až po jisté době se začne tato deformace lokalizovat. Nastává ztenčení plechu, které předchází meznímu stavu – vzniku trhliny. Z důvodu eliminace vlivu tohoto jevu je potřeba při vyhodnocení této zkoušky postupovat dle normy ISO/DIS 12004-2, která se používá při měření diagramů mezních přetvoření - DMP. V tab. 11.7. jsou uvedeny hodnoty deformace podle této normy a také maximální naměřené hodnoty deformace v okamžiku předcházejícím meznímu stavu.

Po naměření hodnot deformace pro konkrétní sérii vzorků bylo nutné data přepočítat. Pro každý pořízený snímek byla vypočítána deformace na povrchu tvářeného vzorku. Snímání bylo prováděno vždy do vzniku trhliny na povrchu tvářeného vzorku. První snímek s viditelnou trhlinou je brán jako okamžik ukončení zkoušky. Předcházející snímek byl použit pro výpočet mezního stavu, kde byl proveden řez podél spodní hrany vzorku. Ze získaného průběhu deformace je nutné zjistit mezní deformaci ϕ_1 . Postup získání mezních deformací upravuje výše zmíněná norma. Prakticky se jedná o nalezení lokálních extrémů, které vymezí oblast lokalizace deformace. Tato oblast se neuvažuje pro nalezení maximální deformace. Body mimo tuto oblast (počet bodů určuje norma) je nakonec proložena inverzní parabola. Maximum této paraboly představuje maximální deformaci, na základě které byly porovnány jednotlivé technologie přípravy materiálu. Na obr. 11.29. je vidět rozložení deformace v okamžiku předcházejícímu meznímu stavu a na obr. 11.30. je vidět proložená inverzní parabola pro toto rozložení deformace s vypočteným maximem. Je vidět, že z původní maximální hodnoty 0,633 poklesla logaritmická deformace na hodnotu 0,331 (pokles o přibližně 47%, kde jako 100% byla uvažována hodnota 0,633).



Stage 181

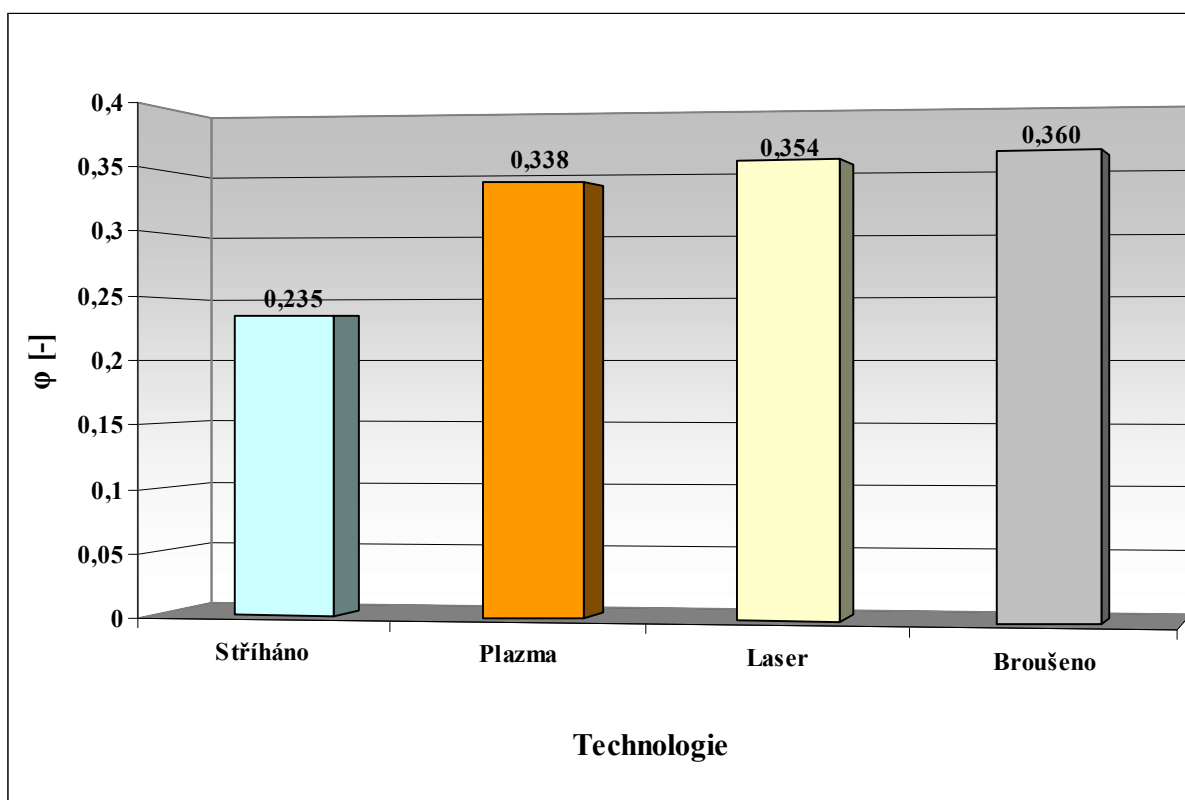
Obr. 11.29. DOCOL 1200 M - rozložení deformace v okamžiku předcházejícím meznímu stavu – broušeno, vzorek č.4



Obr. 11.30. DOCOL 1200 M - proložení křivky inverzní parabolou s nově stanoveným maximem – broušeno, vzorek č.4

Tab. 11.7. Velikost deformace (dle normy a maximální) v závislosti na technologii dělení - střední hodnoty ze 3 měření pro Docol 1200 M

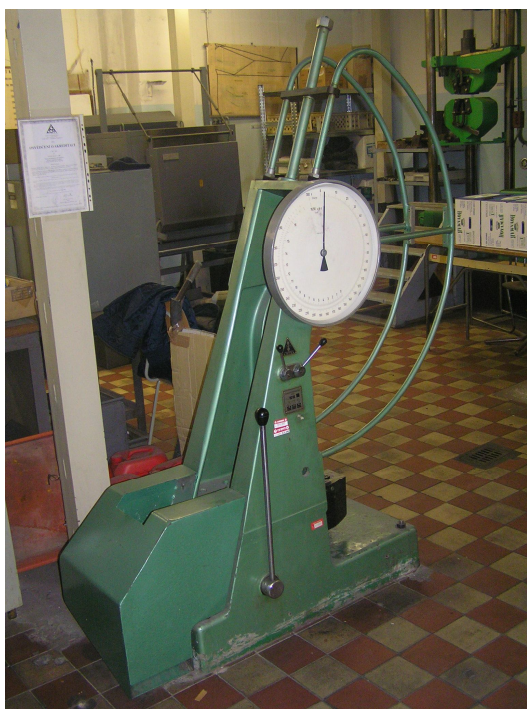
Třibodový ohyb – DOCOL 1200 M						
TECHNOLOGIE	Deformace dle normy \bar{x}_φ [-]	s	Max. deformace \bar{x}_φ [-]	s	Úhel ohybu \bar{x}_α [°]	s
Broušeno	0,360	0,004	0,668	0,040	43,2	2,5
Stříháno	0,235	0,007	0,404	0,020	29,0	1,8
Laser	0,354	0,009	0,705	0,025	44,0	3,1
Plazma	0,338	0,008	0,615	0,016	44,7	1,9



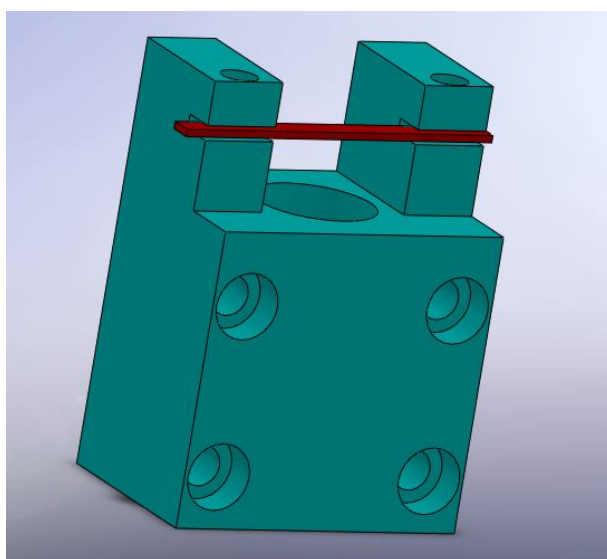
Obr. 11.31. DOCOL 1200 M - závislosti deformace φ na technologii přípravy

11.1.4. Výsledky zkoušky rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu probíhala na Charpyho kladivu **VEB WERKSTOFFPRUFMASCHIENE** (obr. 11.32.) s maximální hodnotou rázové práce **300 J**. Pro upnutí vzorku byl použit speciální přípravek, který zaručuje přesnou polohu vzorku vůči místu dopadu kladiva (obr. 11.33.). Rychlost dopadu kladiva je přibližně **6 m·s⁻¹**. Do statistického vyhodnocení bylo zahrnuto celkem **10 vzorků** od každé série a materiálu. Rozměry vzorků byly **55 x 7 mm**, tloušťka **2 mm**. Zkouška slouží pouze pro porovnání vlivu technologie dělení v rámci celého experimentu (zkušební tělesa neodpovídají normě). Vzorek po dosažení mezního stavu je na obr. 11.34.



Obr. 11.32. Charpyho kladivo



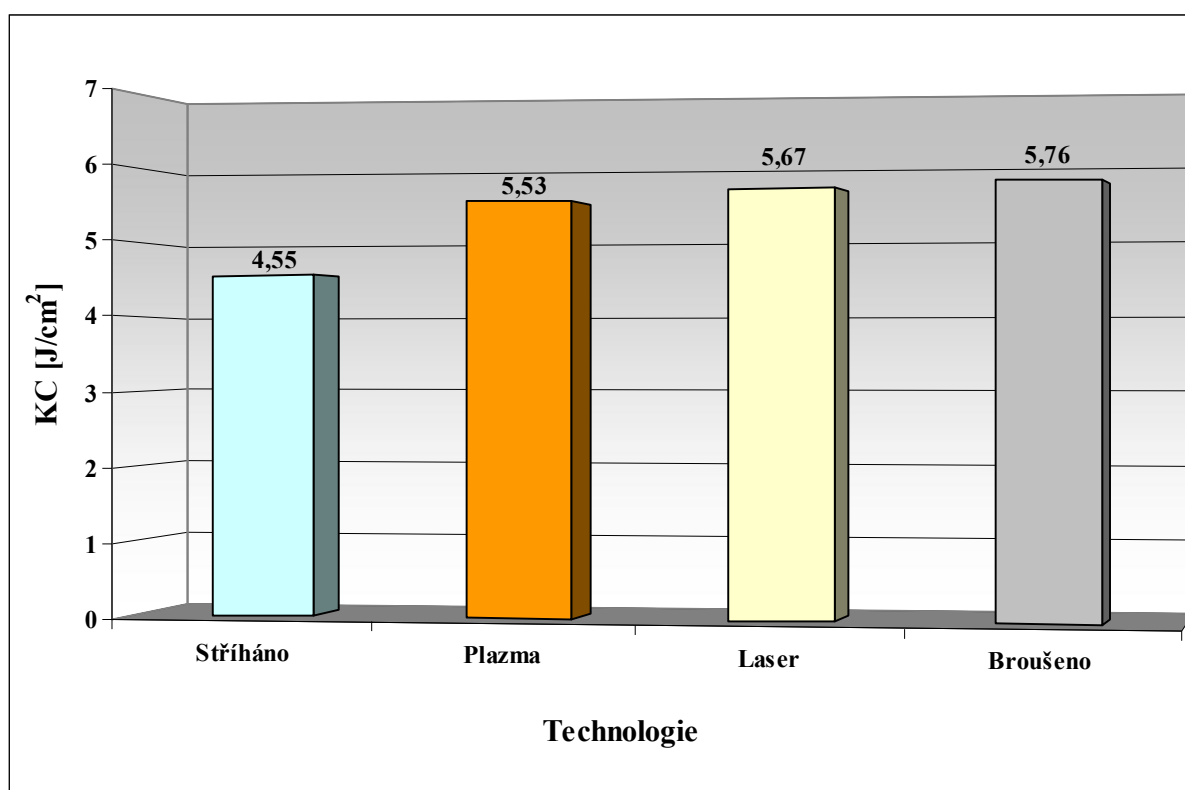
Obr. 11.33. Přípravek pro upnutí vzorku



Obr. 11.34. Detail broušeného vzorku po dosažení mezního stavu DOCOL 1200 M, broušeno

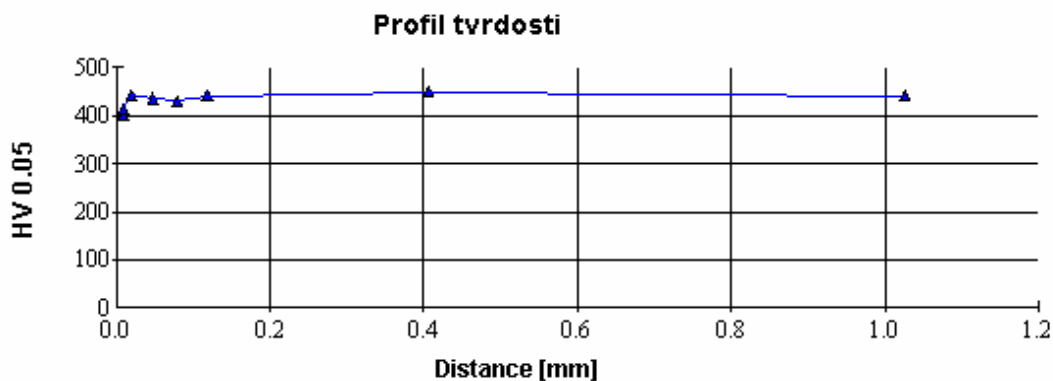
Tab. 11.8. Velikost rázové práce v závislosti na technologii přípravy - střední hodnoty z 10 měření pro DOCOL 1200 M

Zkouška rázem v ohybu – DOCOL 1200 M		
TECHNOLOGIE	$\bar{x}_{KC} [J/cm^2]$	s
Broušeno	5,76	0,07
Stříháno	4,55	0,16
Laser	5,67	0,11
Plazma	5,53	0,09



Obr. 11.35. DOCOL 1200 M - závislost rázové práce **KC** na technologii přípravy

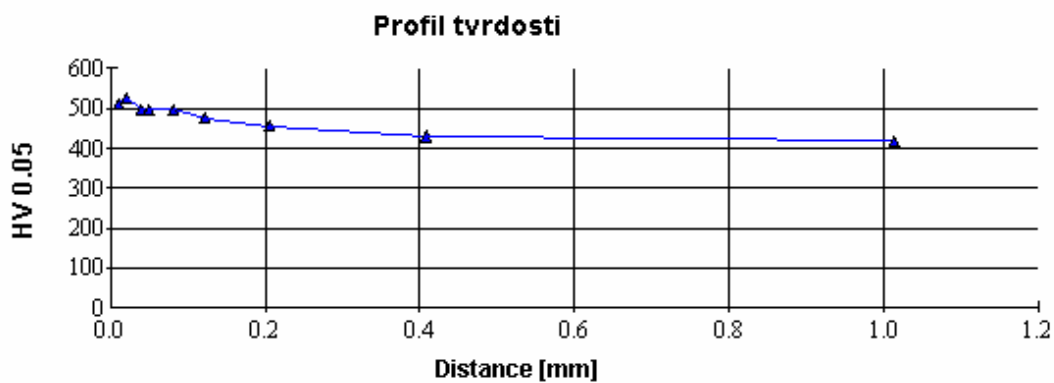
11.1.5. Struktury a gradienty tvrdosti v ovlivněné oblasti - DOCOL 1200 M



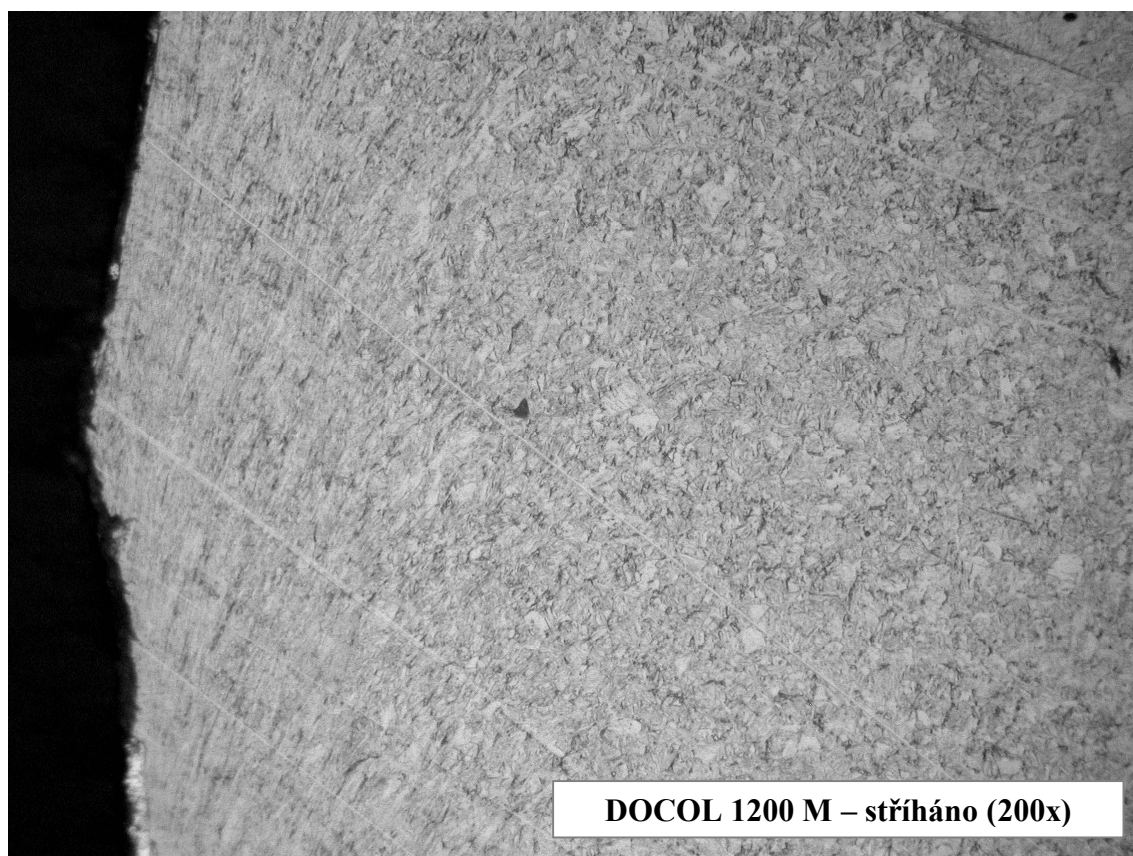
Obr. 11.36. Gradient tvrdosti – DOCOL 1200 M – broušeno



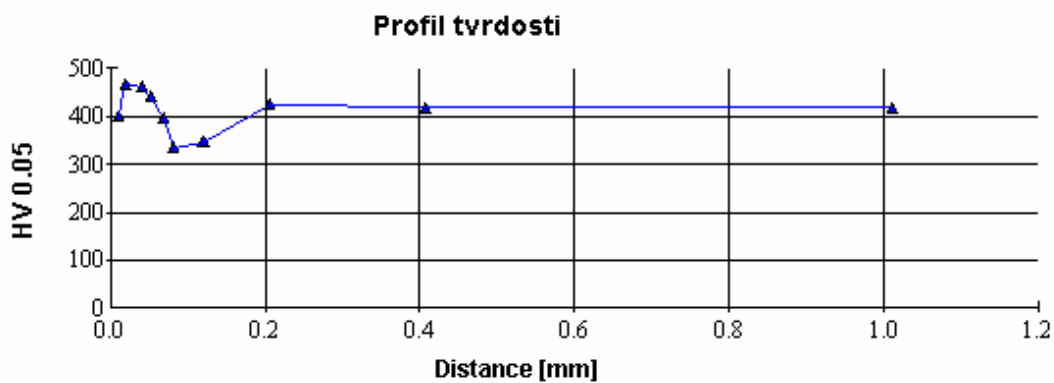
Obr. 11.37. DOCOL 1200 M – broušeno



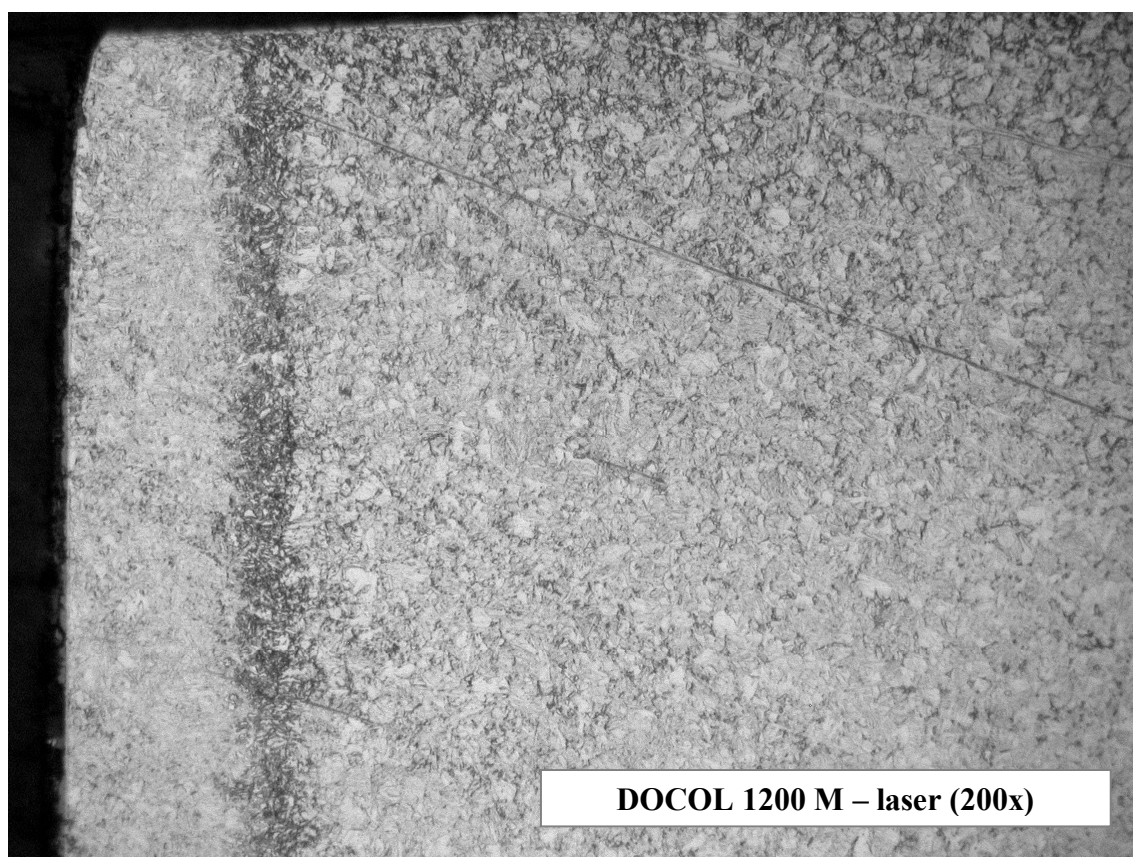
Obr. 11.38. Gradient tvrdosti – DOCOL 1200 M – stříháno (tabulové nůžky)



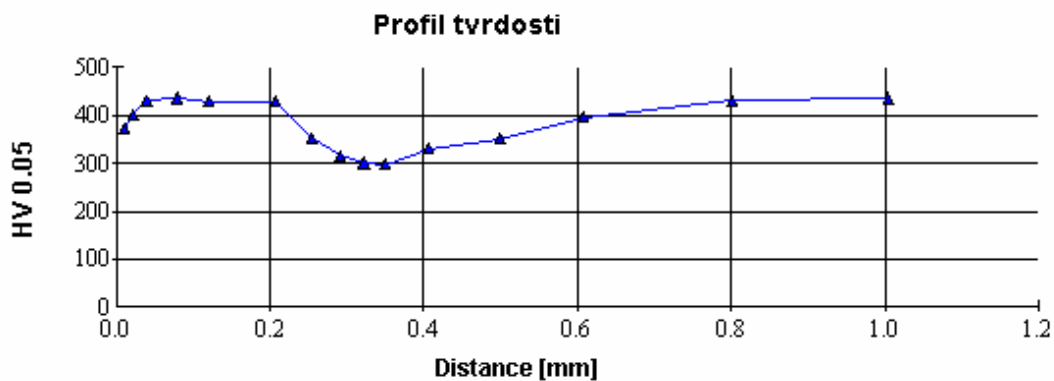
Obr. 11.39. DOCOL 1200 M – stříháno (tabulové nůžky)



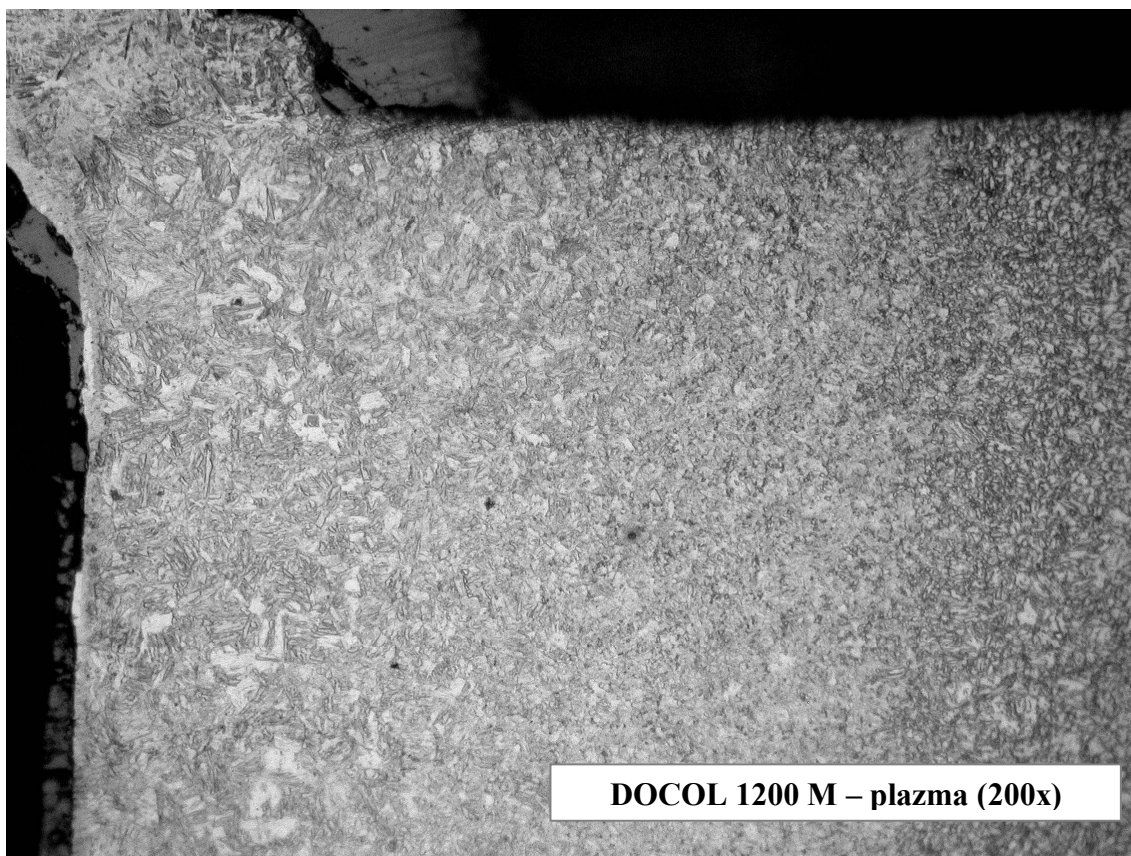
Obr. 11.40. Gradient tvrdosti – DOCOL 1200 M – laser



Obr. 11.41. DOCOL 1200 M - laser



Obr. 11.42. Gradient tvrdosti – DOCOL 1200 M – plazma



Obr. 11.43. DOCOL 1200 M – plazma

11.1.6. Dílčí závěry - DOCOL 1200 M

Statická zkouška tahem potvrdila, že materiál DOCOL 1200 M je prakticky izotropní. Proto byly všechny další zkoušky prováděny pouze ve směru válcování 0° . Při porovnání meze pevnosti R_m je dobře patrné, že k jejímu poklesu došlo nejvíce u série vzorků řezaných plazmou a série stříhaných vzorků. Naopak k nepatrnému zvýšení pevnosti došlo u série řezané laserem. V následujícím procentuálním srovnání je jako 100 % pro výpočet uvažována vždy maximální naměřená hodnota. Rozdíl v mezi pevnosti R_m mezi oběma extrémy je **3,3%**. Obdobný trend je i u smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$, kde největší pokles je zaznamenán u vzorku stříhaného, nejvyšší mez kluzu má opět laser. Rozdíl mezi oběma extrémy je **3,4%**. Pokud bereme broušený vzorek jako etalon, všechny ostatní technologie jsou z hlediska dosažené tažnosti horší. Nejmenší tažnost A_{50mm} má podle předpokladu technologie stříhání, následně plazma a laser. Rozdíl mezi maximální a minimální tažností A_{50mm} u stříhaného a broušeného vzorku je **19,3%**. Pro celkové posouzení byly jednotlivé technologie porovnávány také podle komplexního ukazatele tvařitelnosti (**KUT**). Trend byl shodný s tažností, nejhorší **KUT** měla tedy sada stříhaných vzorků, následně plazma, laser a nejlepší **KUT** měla sada broušených vzorků. Rozdíl mezi oběma extrémy je **19,1%**. Za povšimnutí rovněž stojí, že střížná plocha (v řezu - obr.11.18.) nemá typický podkos směrem do materiálu, ale tento je orientován směrem ven. Tento jev je vysvětlitelný skutečností, že rovné stříhy byly prováděny na tabulových nůžkách NTE 2000/4, které nejsou vhodné k dělení materiálů s tak vysokou pevností. Docházelo tak k „couvání“ materiálu pod přidržovačem.

Zkouška **rozšiřováním otvoru** měla dvě dílčí části. První část byla zaměřena na zjištění vhodné střížné vůle. Jako optimální (maximální φ_l) byla zjištěna vůle mezi 20 a 30% tloušťky stříhaného materiálu. Vůle s konkrétní hodnotou **24%** tloušťky materiálu, kde bylo dosaženo největší tangenciální deformace, byla následně porovnávána s ostatními technologiemi. Bylo zjištěno, že nejvyšší tangenciální deformace je u série broušených vzorků, nejmenší pak podle předpokladu u stříhané série, následovala plazma a nejbližze broušené sérii se přiblížila série připravovaná pomocí laseru. Nutno podotknout, že zejména u plazmy (ale i u laseru) docházelo vlivem technologie dělení ke vzniku vrubu v oblasti, kde hořák dokončil celou kruhovou trajektorii. V tomto místě došlo ve většině případů ke vzniku trhliny právě díky vzniklému vrubu (obr. 11.44.). Nebylo tak objektivně možné posoudit velikost maximální deformace, protože ke vzniku lomu došlo v důsledku vrubu, nikoliv v důsledku vyčerpání plasticity materiálu. Z tohoto důvodu lze považovat přínos této zkoušky (alespoň co se týče

technologie přípravy vzorků pomocí laseru a plazmy) za nepatrný. Rozdíl mezi broušenými a stříhanými vzorky z hlediska dosažené deformace je **23,6%**.



Obr. 11.44. DOCOL 1200 M - otvor řezaný plazmou s patrným vrubem

Pro vyhodnocení zkoušky **tříbodovým ohybem**, kde jako porovnávací kritérium byla maximální dosažená deformace, byl využit bezkontaktní měřicí systém ARAMIS. Výsledná maximální deformace se může na první pohled zdát vysoká (oproti výsledkům z ostatních zkoušek), nicméně je to dáno stavem napjatosti a především skutečností, že tento systém zaznamená maximální dosaženou deformaci v rámci měřené oblasti. Toto napětí je zaznamenáno na čele trhliny a je koncentrováno na velmi malé ploše. Pro potlačení vlivu ztenčení vzorku v průběhu zkoušky byly tyto hodnoty maximální deformace přepočteny dle normy **ISO/DIS 12004-2**. Porovnání pořadí jednotlivých technologií dle maximální deformace a deformace po přepočtu dle normy není stejné a je dáno především derivací křivky rozložení deformace na vnější hraně vzorku. Dle kritéria maximální deformace je vzhledem k broušenému etalonu vyšší deformace u technologie dělení pomocí laseru, nejnižší dle předpokladu u technologie stříhání, následuje technologie dělení pomocí plazmy. Rozdíl mezi oběma extrémy je **39,5%**. Dle korektnějšího kritéria, kde byly porovnávány velikosti deformace po přepočtu vykazovala nejvyšší deformaci série broušených vzorků, následně s těsným odstupem laser a plazma, nejnižší deformace opět vykazovala technologie stříhání. Rozdíl mezi oběma extrémy je **34,7%**.

Poslední zkouškou, která měla mimo vlastní technologie zohlednit i podstatně vyšší rychlost zatěžování vzorku, byla **zkouška rázem v ohybu**. Porovnávacím kritériem bylo množství práce potřebné k přeražení vzorku bez vrubu s definovaným průřezem přepočtené na jednotku plochy (J/cm^2). V porovnání s broušeným etalonem se umístily ostatní technologie níže, to znamená, že k přeražení vzorku stačilo menší množství práce. Konkrétně

nejníže se umístily stříhané vzorky, dále vzorky řezané plazmou a těsně pod broušenými se umístily vzorky řezané laserem. Rozdíl mezi oběma extrémy je **21%**.

Z gradientů mikrotvrdostí a struktur je dobře patrné, které technologie a jakým způsobem ovlivnily mechanické vlastnosti materiálu. Základní tvrdost materiálu DOCOL 1200 M je přibližně 420 HV. Pro zhotovení etalonu byla použita technologie broušení s chlazením s cílem eliminovat mechanické a tepelné ovlivnění základního materiálu. Při pohledu na závislost gradientu tvrdosti u **technologie broušení** lze konstatovat, že tomu tak skutečně bylo, protože zde došlo jen k nepatrnému poklesu tvrdosti vůči základnímu materiálu. Na obr. 11.37. je vidět, že základní struktura materiálu nebyla ovlivněna. U **technologie stříhání** je v důsledku deformačního zpevnění znatelný nárůst tvrdosti. Hodnota tvrdosti nabývá maxima právě na čele střížné hrany (přibližně 520 HV) a plynule klesá na hodnotu tvrdosti základního materiálu, což je cca 0,4 mm od střížné hrany. Na obr. 11.39. je dobře patrná deformační textura. U **technologie dělení pomocí laseru** došlo k nárůstu tvrdosti přibližně na 470 HV ve vzdálenosti 0,05 mm od řezné hrany, následně tvrdost klesla na 340 HV ve vzdálenosti 0,1 mm. Ve vzdálenosti přibližně 0,2 mm od řezné hrany již byla tvrdost materiálu na ustálené hodnotě (tvrdost základního materiálu 420 HV). Na obr. 11.41. je zřetelně vidět tepelně ovlivněná oblast. U **technologie dělení pomocí plazmy** je trend podobný, jako u laseru s tím rozdílem, že jednotlivá pásma jsou v důsledku nižší hustoty energie širší. Ustálená hodnota tvrdosti je prakticky až 1 mm od řezané hrany, což je v porovnání s ostatními technologiemi několikanásobně větší vzdálenost. Lze si všimnout, že prakticky nedošlo ke zvýšení tvrdosti materiálu na řezané hraně. K významnější změně (pokles tvrdosti až na 300 HV) došlo přibližně 0,35 mm od řezané hrany. Od tohoto minima hodnota tvrdosti téměř lineárně roste až na hodnotu tvrdosti základního materiálu. Na obr. 11.43. je dobře patrné zhrubnutí zrna v tepelně ovlivněné oblasti. Pro lepší názornost jsou v tab. 11.9. uvedeny naměřené hodnoty týkající se vlastností sledované hrany. Hodnoty drsnosti povrchu jsou pouze orientační a uvedené hodnoty jsou aritmetické průměry ze tří měření. Protože střížná hrana je specifická svými pásmy (zejména pásmo utržení a čistého smyku), jsou hodnoty drsnosti uvedeny v intervalu zohledňujícím tato pásma. U ostatních technologií můžeme prohlásit, že drsnost povrchu je v celé sledované tloušťce téměř konstantní.

Tab. 11.9. DOCOL 1200 M - vlastnosti hrany ovlivněné jednotlivými technologiemi

DOCOL 1200 M, tvrdost základního materiálu cca 420 HV				
Technologie	R _a [μm]	R _z [μm]	HV	hloubky ovlivněné oblasti [mm]
Broušeno	0,4	2,4	400 - 430	0,15
Stříháno	1,2-2,3	6,5-12,3	420 - 520	0,40
Laser	2,1	12,5	340 - 470	0,20
Plazma	2,7	17,3	300 - 440	0,9

Pokud se zaměříme na hodnoty uvedené v tab. 11.9. a porovnáme umístění jednotlivých technologií v rámci provedených zkoušek, ukazuje se, že vliv drsnosti povrchu hrany je daleko méně významný než její tvrdost. Je to dobře patrné zejména na sérii vzorků řezaných laserem a připravovaných stříháním. Drsnost povrchu je u obou zmiňovaných technologií velice podobná (hovoří spíše ve prospěch stříhání), nicméně rozdíly mezi těmito technologiemi jsou naopak ve prospěch laseru. To je dobře patrné po přepočtu vyjadřujícím tento rozdíl v %, kde jsou hodnoty uvedeny později v kap. 12. v tab. 12.2. (rozdíly jsou v závislosti na typu zkoušky od cca 15,7 do 33,6% vždy ve prospěch laseru). Z fotografických snímků (obr. 11.15. až 11.18.) zachycujících střížnou hranu před deformací (ať u stříhání na tabulových nůžkách nebo ve střížném nástroji) je zřejmé, že k poškození zárodečnými trhlinami zde nedošlo (alespoň není patrné při 25-násobném zvětšení). Dá se tedy předpokládat, že pokud následné plastické vlastnosti významně neovlivní ani drsnost povrchu ani zárodečné mikrotrhliny, hraje zde nejvýznamnější roli deformační zpevnění materiálu v okolí místa stříhu.

11.2. BTR 165

Průběh jednotlivých zkoušek včetně podmínek, popisu zařízení a počtu vzorků byl popsán v předešlých kapitolách. Tato kapitola tedy pouze prezentuje naměřené (případně vypočtené) hodnoty materiálu BTR 165.

11.2.1. Výsledky statické zkoušky tahem

Tab. 11.10. BTR 165 - mechanické hodnoty v jednotlivých směrech - střední hodnoty ze 6 měření (broušeno)

t = 2 mm	BTR 165 – BROUŠENO					
	\bar{x}_{0°	s	\bar{x}_{45°	s	\bar{x}_{90°	s
$R_{p0,2}$ [MPa]	1148,38	18,03	1116,51	21,17	1178,43	23,55
R_m [MPa]	1544,55	12,36	1506,50	28,83	1569,44	14,74
A_{50mm} [%]	8,24	0,48	7,25	0,49	7,12	0,24
A_g [%]	3,93	0,29	3,34	0,47	3,53	0,14
KUT [-]	0,061	0,007	0,054	0,004	0,054	0,004

Tab. 11.11. BTR 165 - mechanické hodnoty ve směru 0° - střední hodnoty ze 6 měření (stříháno před kalením)

BTR 165 – STŘÍHÁNO PŘED KALENÍM					
t = 2 mm	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50mm} [%]	A_g [%]	KUT [-]
\bar{x}_{0°	1122,88	1531,31	7,87	3,99	0,058
s	51,50	43,82	0,41	0,27	0,005

Tab. 11.12. BTR 165 - mechanické hodnoty ve směru 0° - střední hodnoty ze 6 měření (stříháno po kalení)

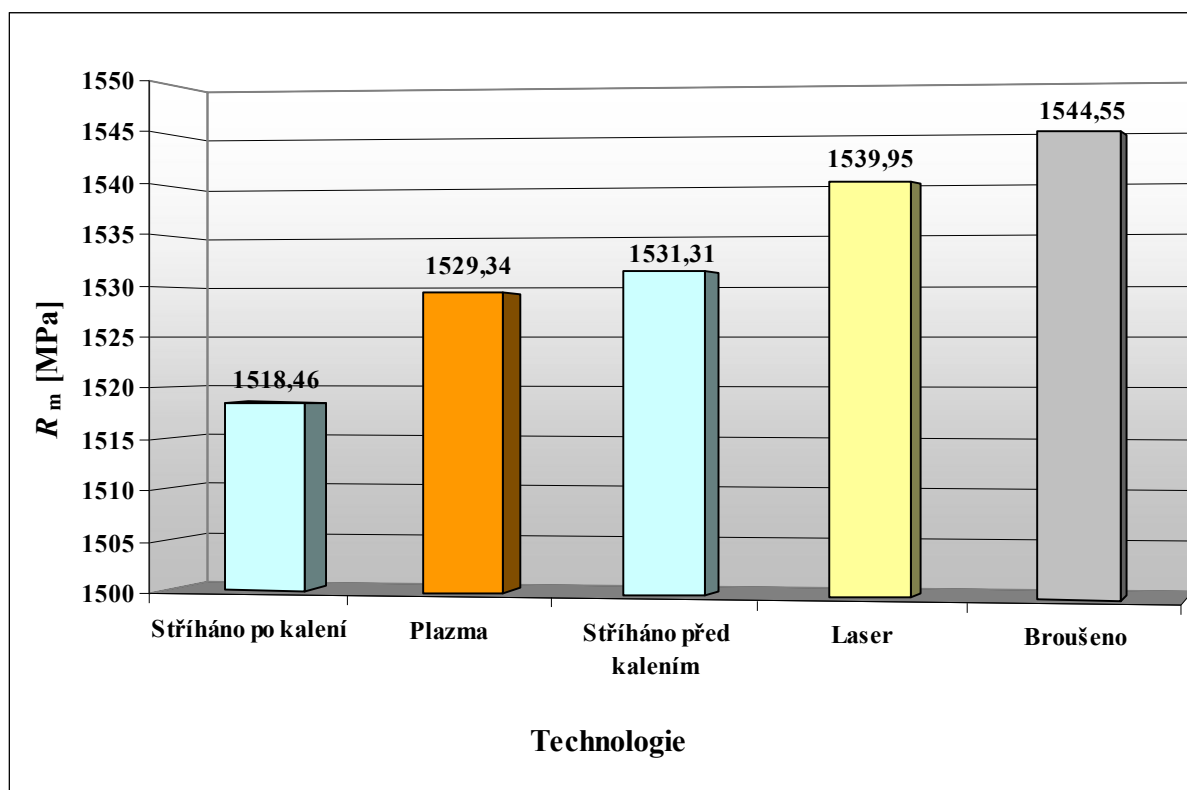
BTR 165 – STŘÍHÁNO PO KALENÍ					
t = 2 mm	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50mm} [%]	A_g [%]	KUT [-]
\bar{x}_{0°	1102,93	1518,46	5,44	3,20	0,040
s	36,60	36,31	0,27	0,16	0,003

Tab. 11.13. BTR 165 - mechanické hodnoty ve směru 0° - střední hodnoty ze 6 měření (laser)

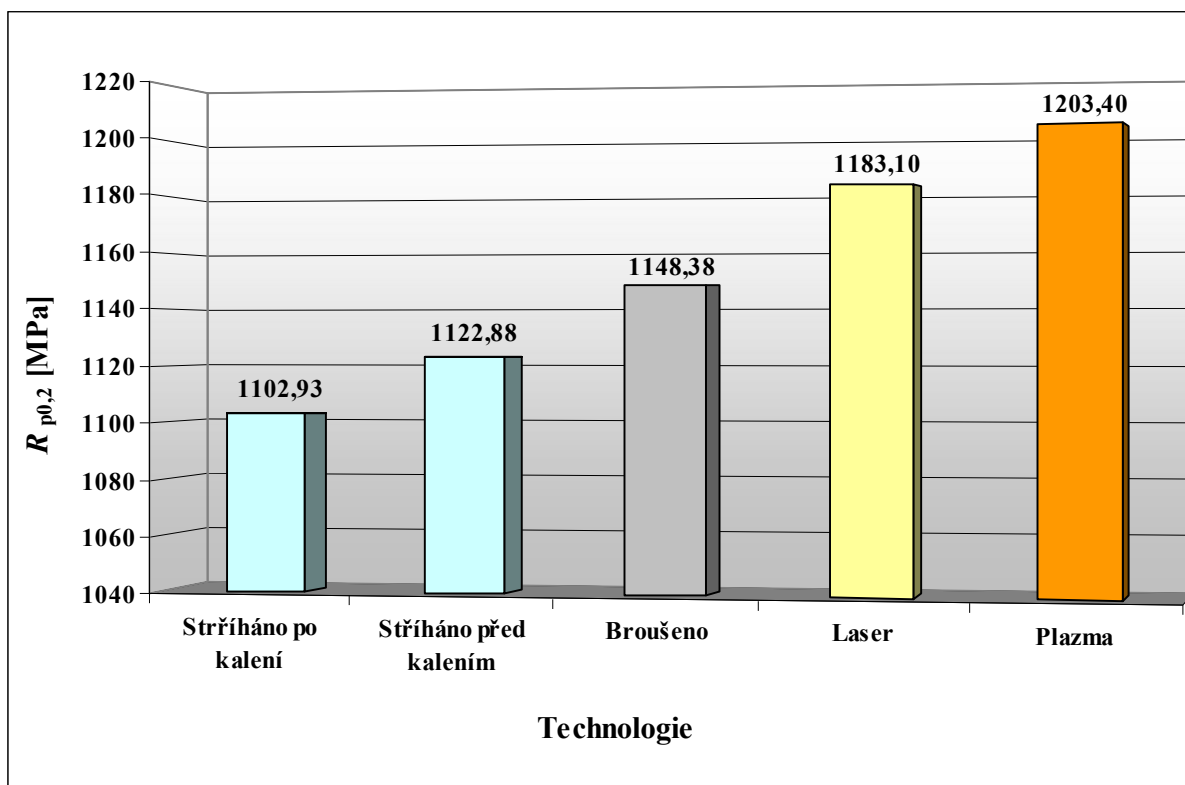
BTR 165 - LASER					
t = 2 mm	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50mm} [%]	A_g [%]	KUT [-]
\bar{x}_{0°	1183,10	1539,95	7,00	3,43	0,054
s	8,22	9,76	0,22	0,50	0,002

Tab. 11.14. BTR 165 - mechanické hodnoty ve směru 0° - střední hodnoty ze 6 měření (plazma)

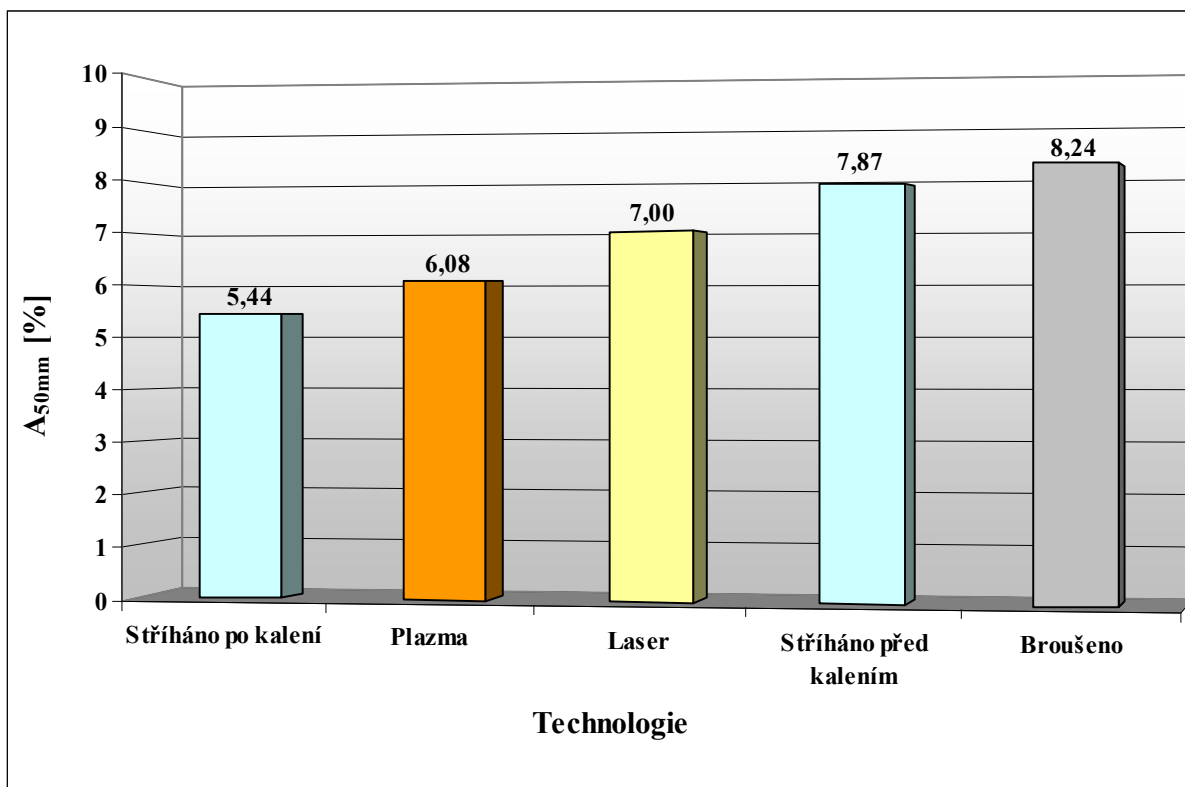
BTR 165 - PLAZMA					
t = 2 mm	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50mm} [%]	A_g [%]	KUT [-]
\bar{x}_{0°	1203,40	1529,34	6,08	2,84	0,048
s	26,67	21,88	0,19	0,31	0,002



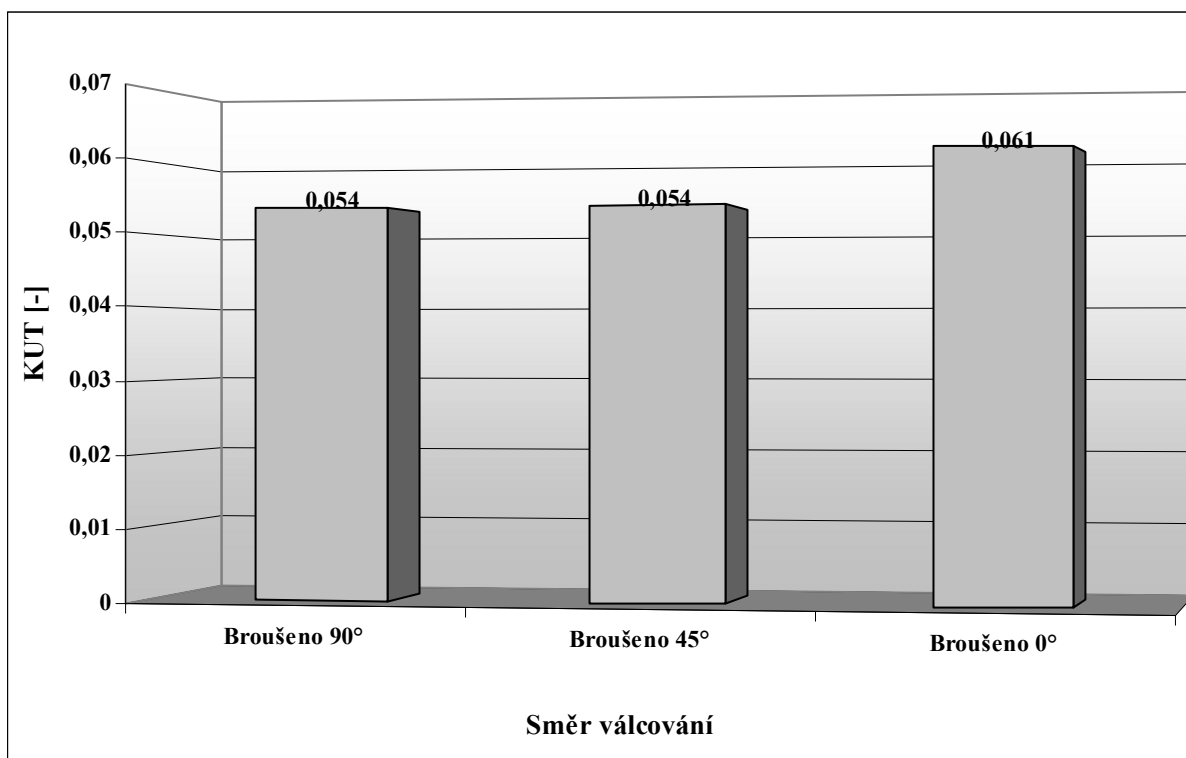
Obr. 11.45. BTR 165 - závislost meze pevnosti R_m na technologii přípravy



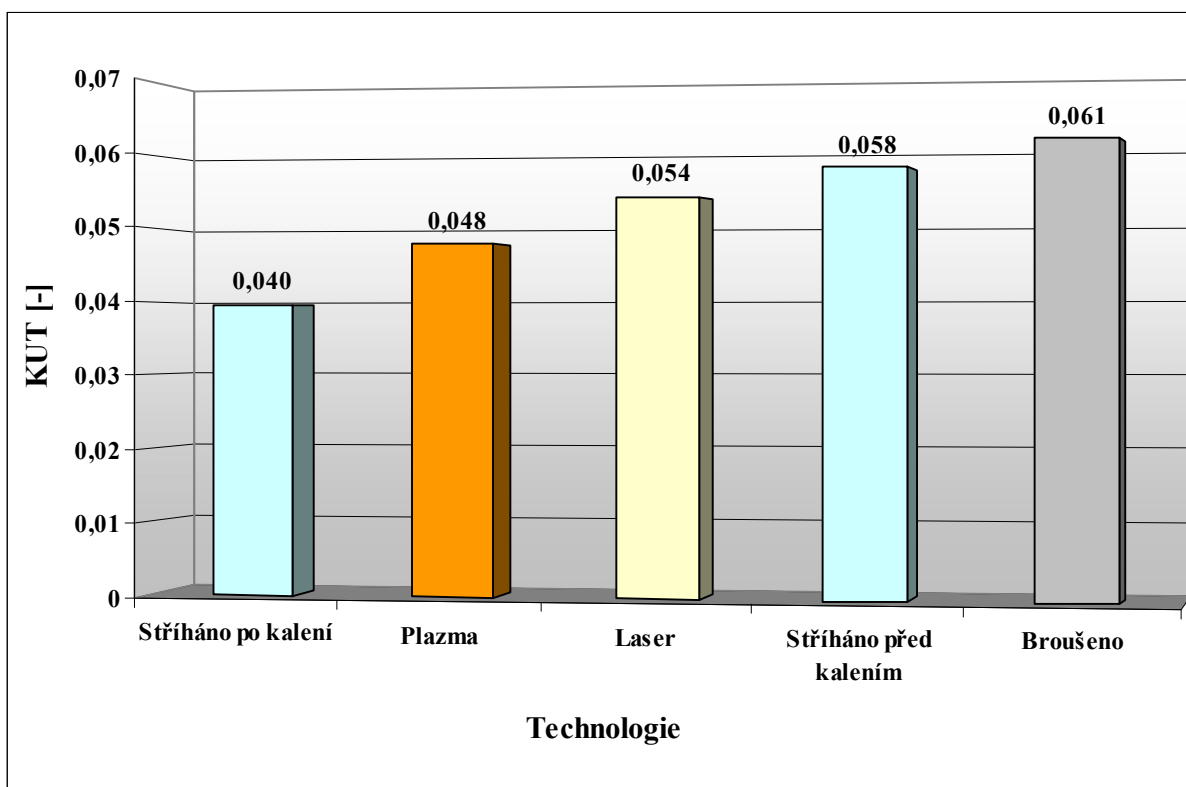
Obr. 11.46. BTR 165 - závislost smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na technologii přípravy



Obr. 11.47. BTR 165 - závislost tažnosti A_{50mm} na technologii přípravy



Obr. 11.48. BTR 165 - závislost KUT na směru válcování



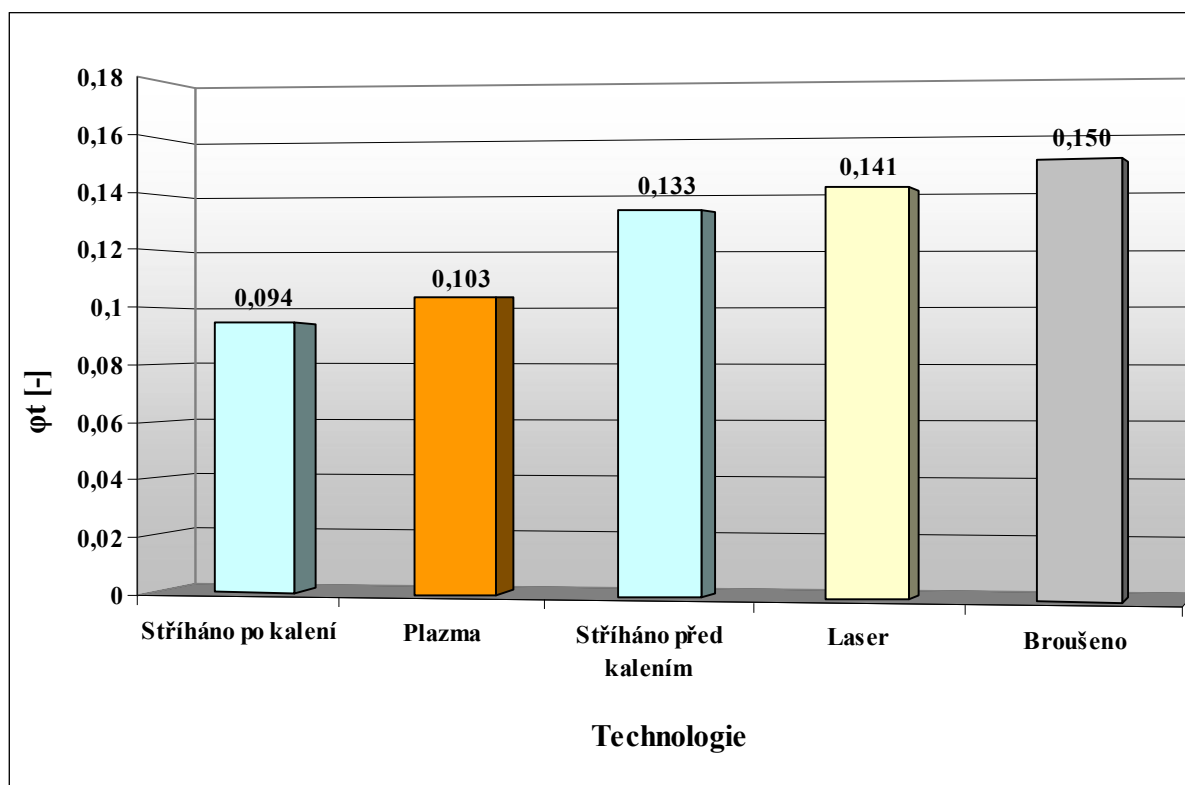
Obr. 11.49. BTR 165 - KUT na technologii přípravy

11.2.2. Výsledky zkoušky rozšiřováním otvoru

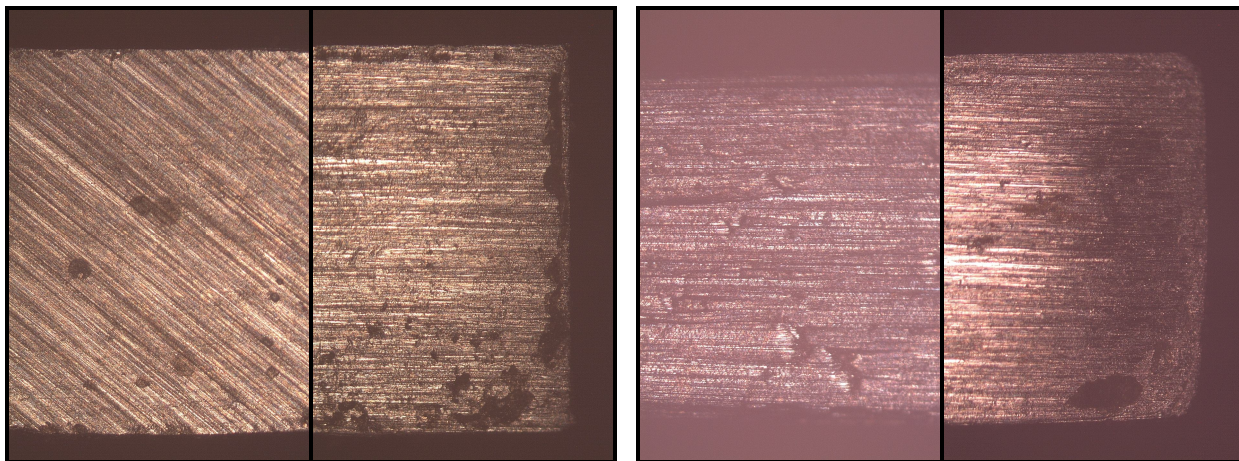
V kapitole 11.1.2. byla zjištěna „optimální“ střížná vůle, která pro materiál DOCOL 1200 M představovala **24%** tloušťky stříhaného materiálu. Z tohoto důvodu již nebyla u materiálu BTR 165 tato vůle zjišťována, protože vzhledem k podobnému charakteru materiálu se dá očekávat obdobný výsledek.

Tab. 11.15. BTR 165 - velikost tangenciální deformace na způsobu dělení - střední hodnoty ze 6 měření

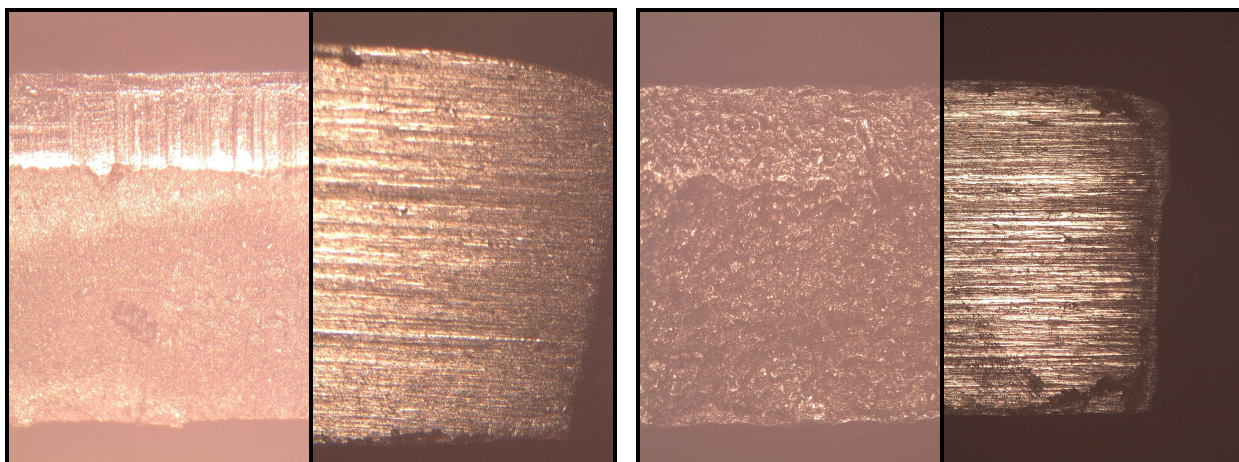
Rozšiřování otvoru - BTR 165		
TECHNOLOGIE	\bar{x}_{φ_t} [-]	s
Broušeno	0,150	0,007
Stříháno před kalením – $v_s = 24\% t$	0,133	0,010
Stříháno po kalení – $v_s = 24\% t$	0,094	0,012
Laser	0,141	0,011
Plazma	0,103	0,010



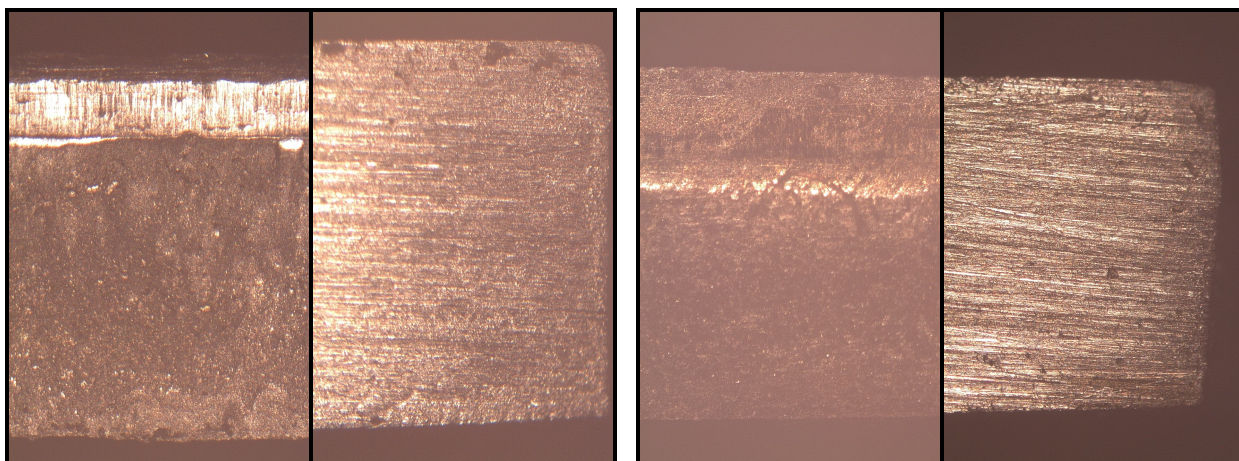
Obr. 11.50. BTR 165 - závislost tangenciální deformace φ_t na technologii přípravy



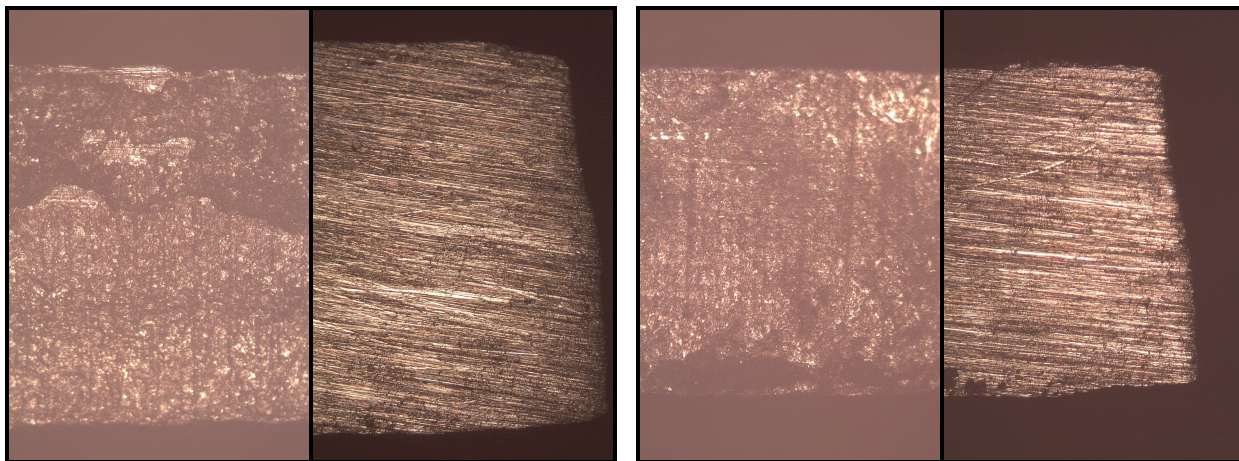
Obr. 11.51. BTR 165 - broušeno, zvětšeno 25x



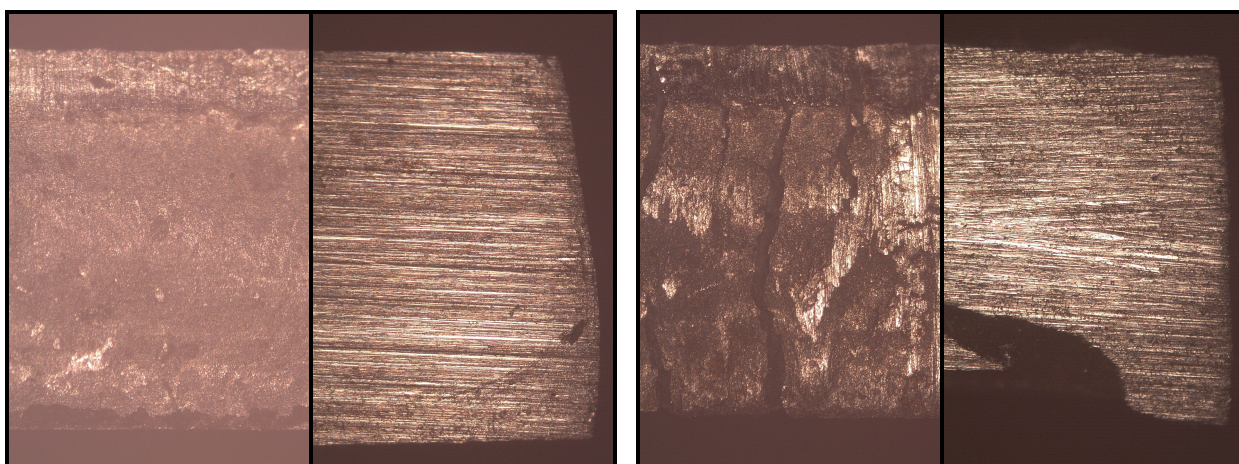
Obr. 11.52. BTR 165 – stříháno před kalením ($v = 24\%$ t), zvětšeno 25x



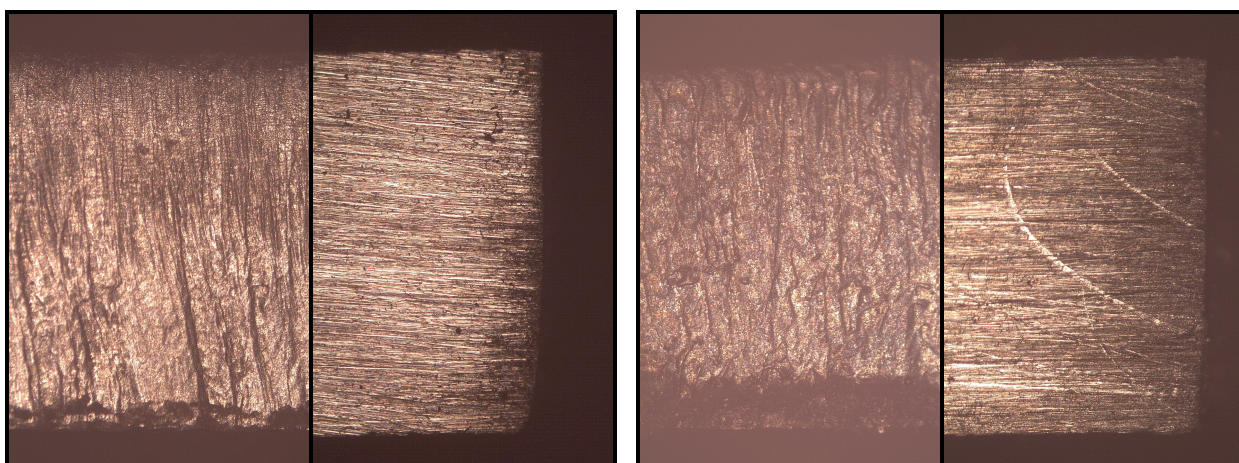
Obr. 11.53. BTR 165 - stříháno po kalení ($v = 24\%$ t), zvětšeno 25x



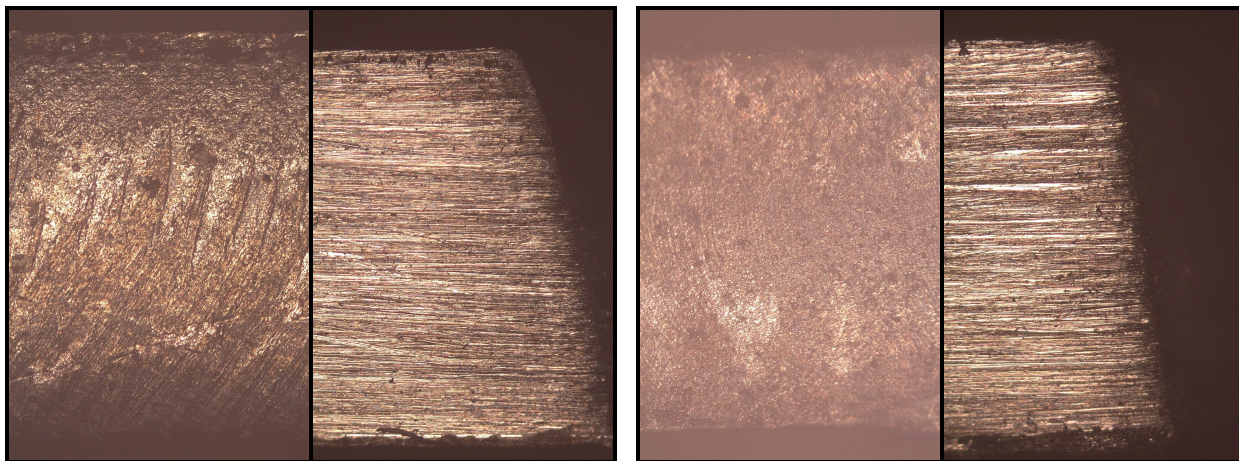
Obr. 11.54. BTR 165 - stříháno před kalením - tabulové nůžky, zvětšeno 25x



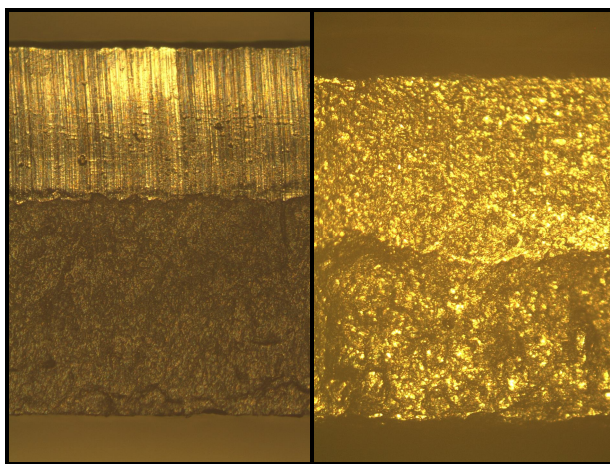
Obr. 11.55. BTR 165 - stříháno po kalení - tabulové nůžky, zvětšeno 25x



Obr. 11.56. BTR 165 – laser, zvětšeno 25x



Obr. 11.57. BTR 165 – plazma, zvětšeno 25x

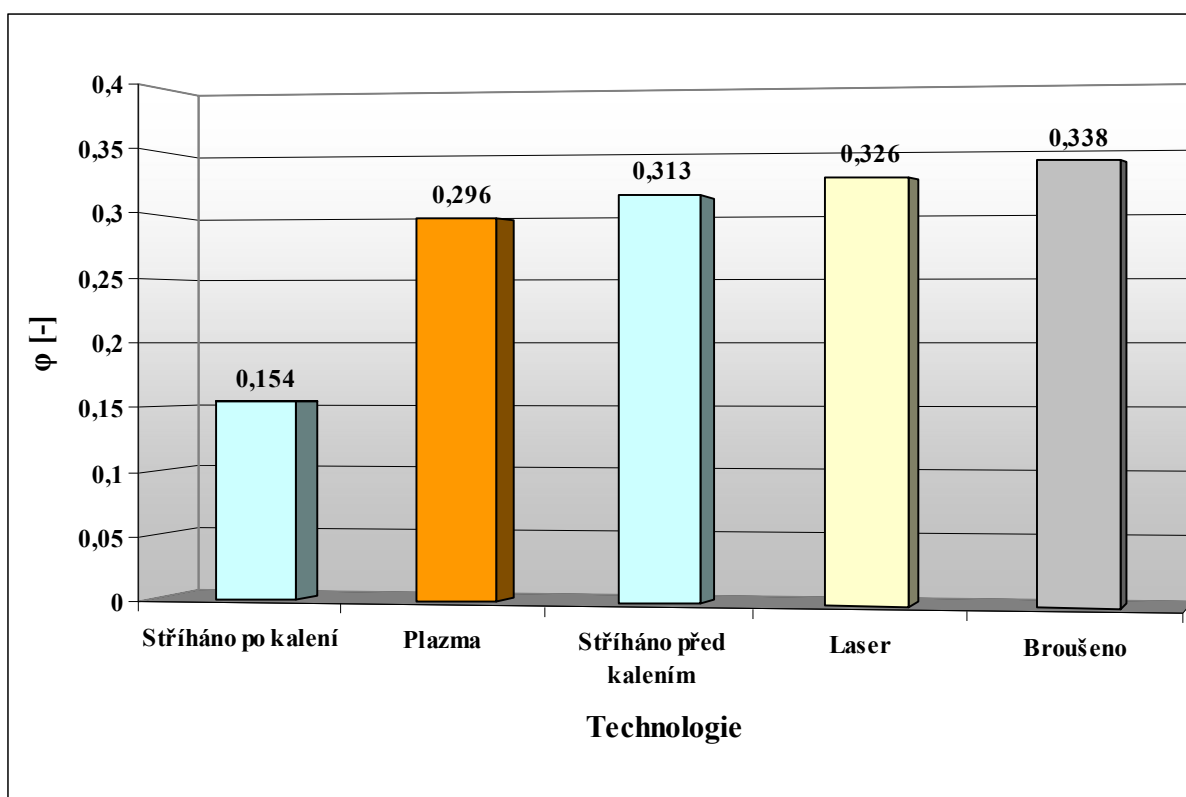


Obr. 11.58. BTR 165, vlevo – stříháno před kalením na tabulových nůžkách, vpravo – děleno sériovým stříhem, zvětšeno 25x

11.2.3. Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem

Tab. 11.16. Velikost deformace (dle normy a maximální) v závislosti na technologii dělení - střední hodnoty ze 3 měření pro BTR 165

Tříbodový ohyb – BTR 165						
TECHNOLOGIE	Deformace dle normy \bar{x}_φ [-]	s	Max. deformace \bar{x}_φ [-]	s	Úhel ohybu \bar{x}_α [°]	s
Broušeno	0,338	0,007	0,628	0,010	43,7	3,5
Stříháno před kalením	0,313	0,004	0,550	0,006	40,9	2,9
Stříháno po kalení	0,154	0,010	0,279	0,011	23,7	2,1
Laser	0,326	0,008	0,640	0,015	45,5	4,8
Plazma	0,296	0,008	0,580	0,010	39,0	1,0

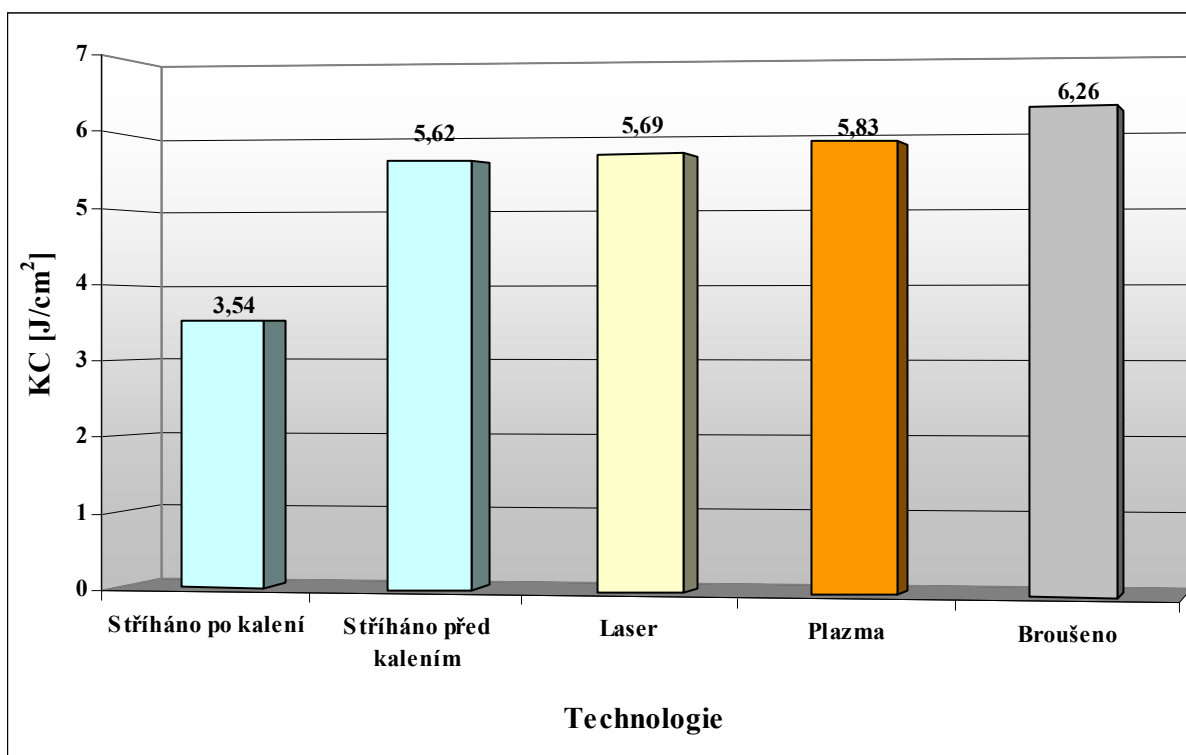


Obr. 11.59. BTR 165 - závislost deformace φ na technologii přípravy

11.2.4. Výsledky zkoušky rázem v ohybu

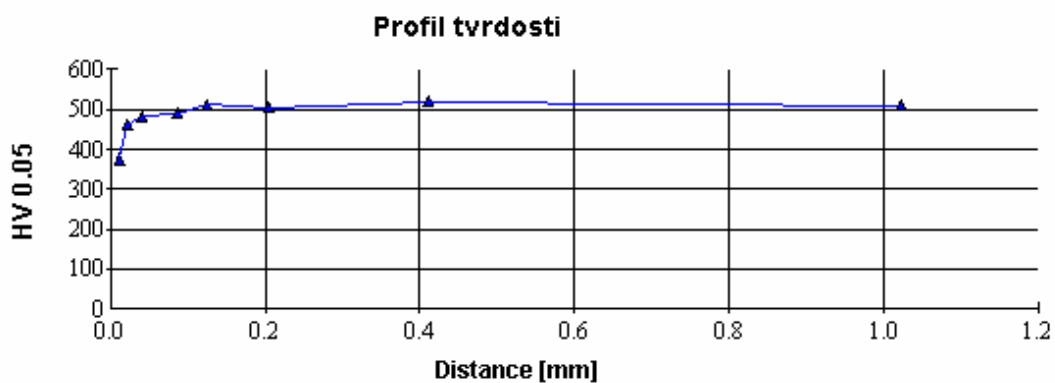
Tab. 11.17. Velikost rázové práce v závislosti na technologii přípravy - střední hodnoty z 10 měření pro BTR 165

Zkouška rázem v ohybu – BTR 165		
TECHNOLOGIE	$\bar{x}_{KC} [J/cm^2]$	s
Broušeno	6,26	0,12
Stříháno před kalením	5,62	0,13
Stříháno po kalení	3,54	0,07
Laser	5,69	0,23
Plazma	5,83	0,22

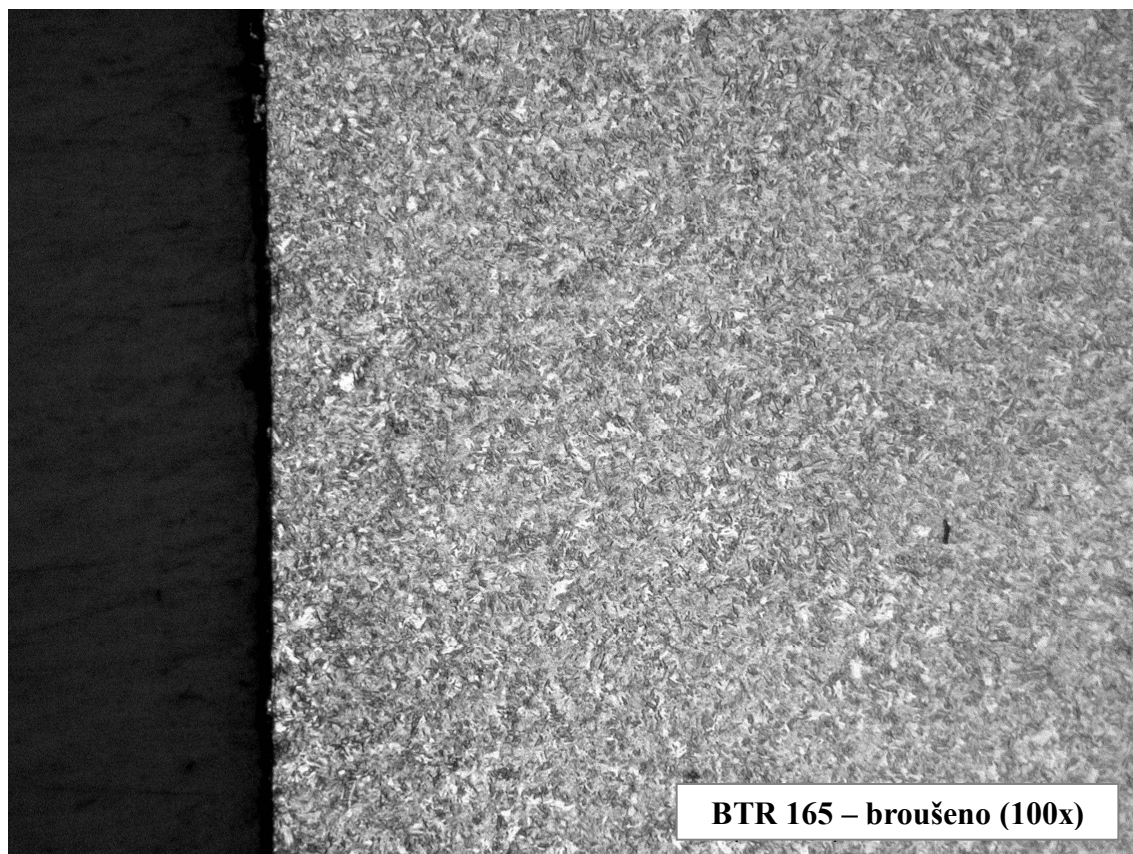


Obr. 11.60. BTR 165 - závislost rázové práce KC na technologii přípravy

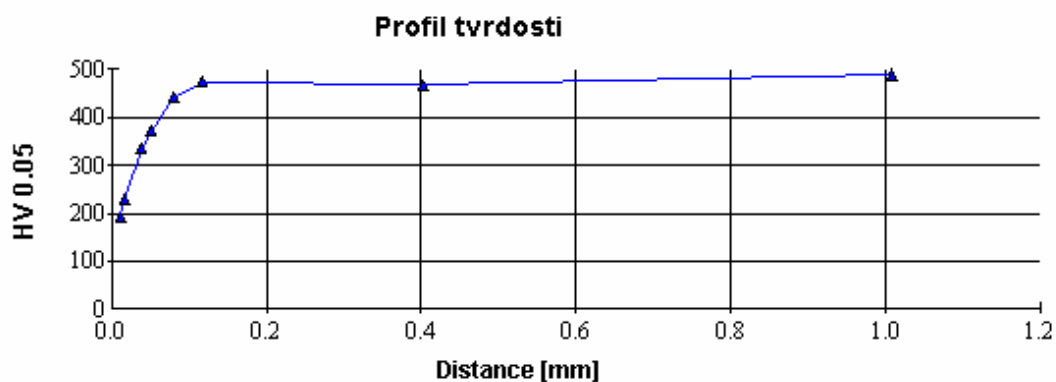
11.2.5. Gradienty tvrdosti a struktury v ovlivněné oblasti – BTR 165



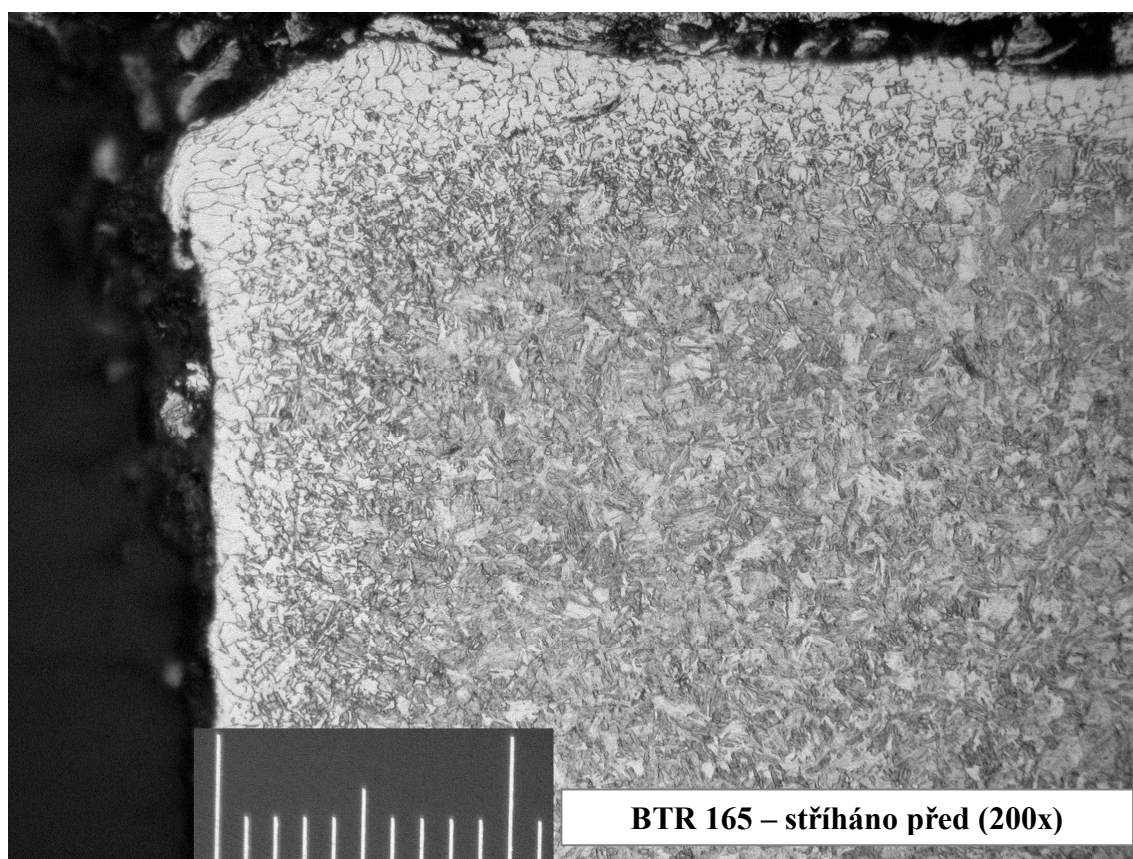
Obr. 11.61. Gradient tvrdosti – BTR 165 – broušeno



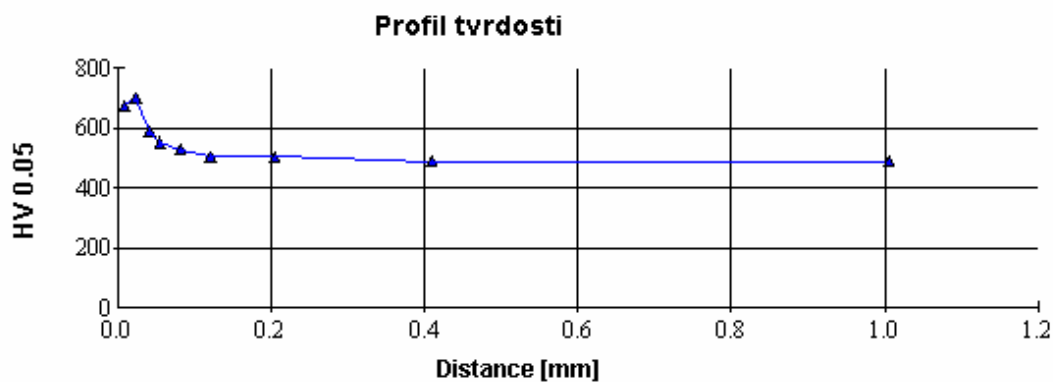
Obr. 11.62. BTR 165 - broušeno



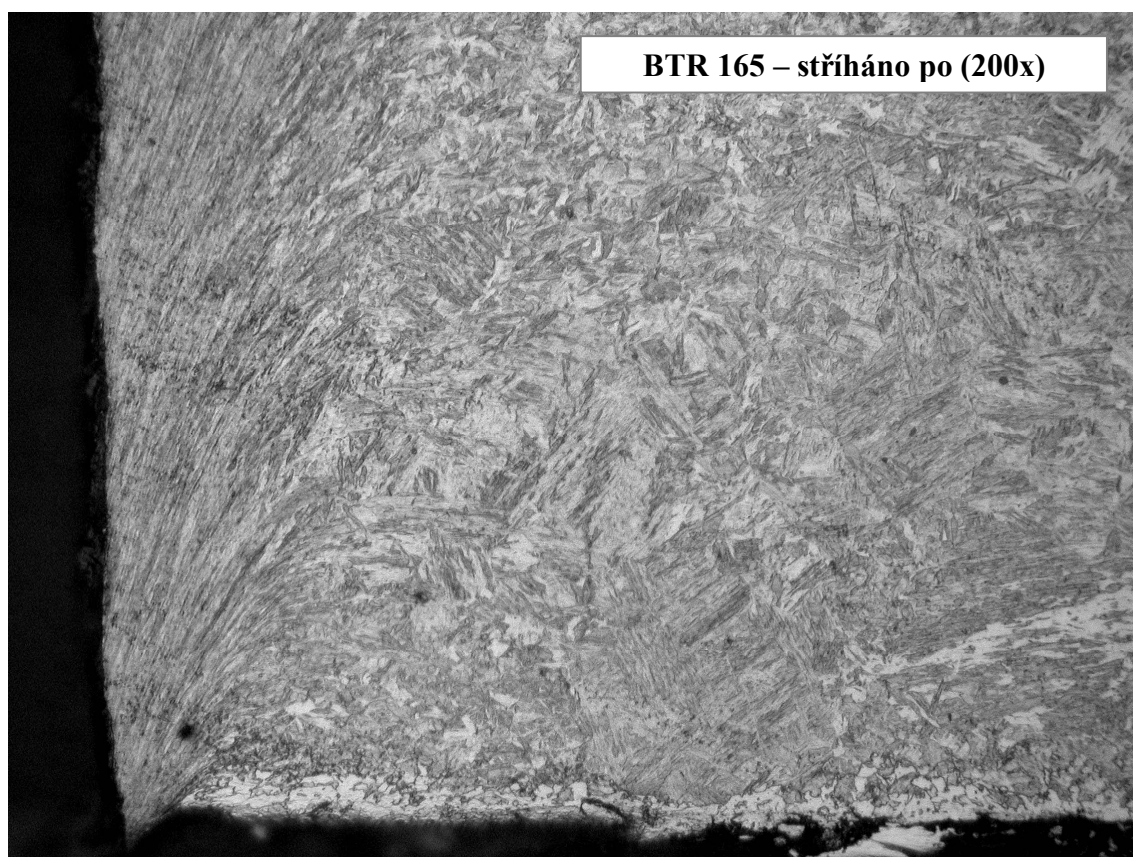
Obr. 11.63. Gradient tvrdosti – BTR 165 – stříháno před kalením



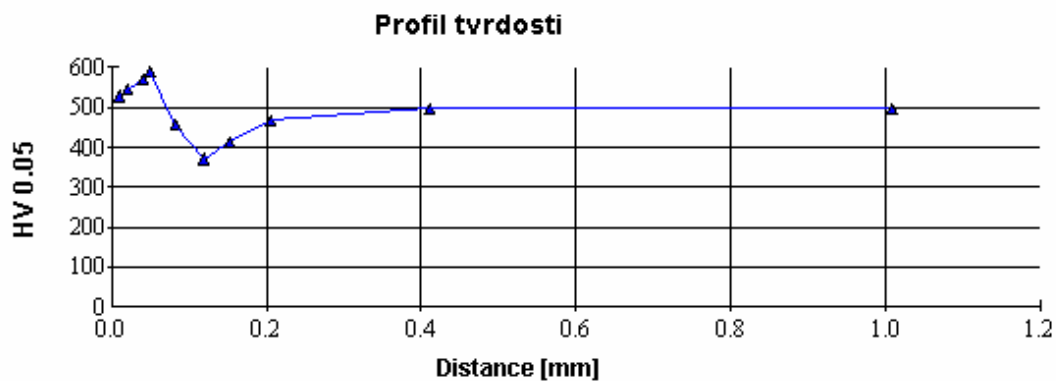
Obr. 11.64. BTR 165 – stříháno před kalením



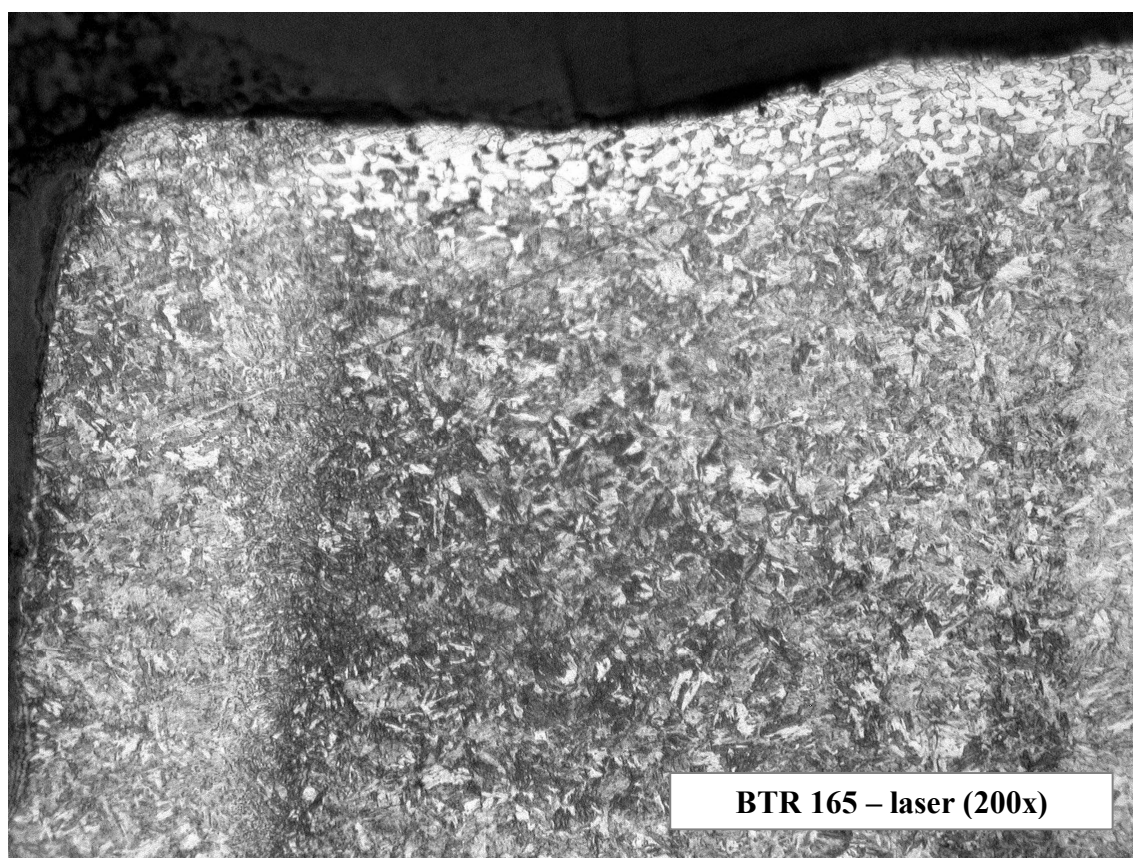
Obr. 11.65. Gradient tvrdosti – BTR 165 – stříháno po kalení



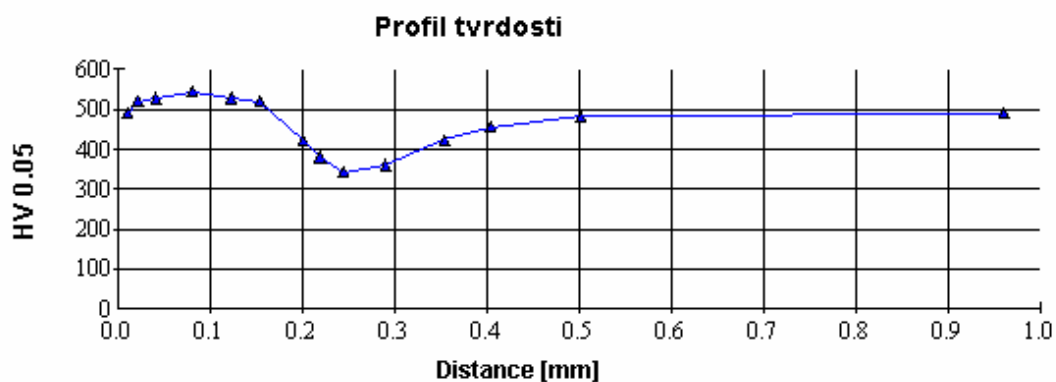
Obr. 11.66. BTR 165 – stříháno po kalení



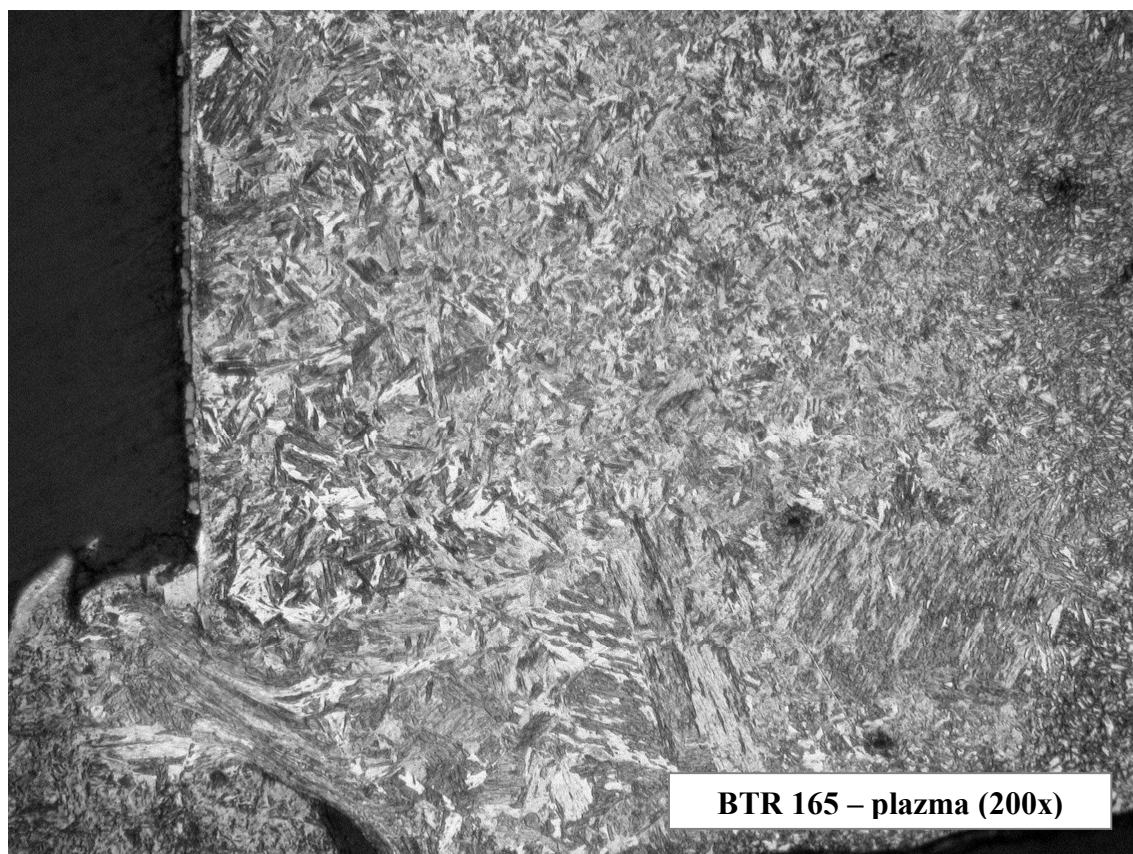
Obr. 11.67. Gradient tvrdosti – BTR 165 – laser



Obr. 11.68. BTR 165 - laser



Obr. 11.69. Gradient tvrdosti – BTR 165 – plazma



Obr. 11.70. BTR 165 – plazma

11.2.6. Dílčí závěry - BTR 165

Statická zkouška tahem opět prokázala téměř izotropní chování tohoto materiálu. Série broušených vzorků vykazovala nejvyšší mez pevnosti R_m . Nejnížší má naopak podle předpokladu materiál stříhaný po kalení. V pořadí další se umístila série vzorků řezaných plazmou, stříhaných před kalením a velmi blízko etalonu byla série vzorků řezaných laserem. Stejně jako u materiálu DOCOL 1200 M je i zde jako 100 % pro výpočet uvažována vždy maximální naměřená hodnota. Rozdíl mezi oběma extrémy je zanedbatelný - pouze 1,7%. Změna meze kluzu $R_{p0,2}$ je významnější než změna meze pevnosti. Vzhledem k broušenému etalonu se série stříhaných vzorků umístily hůře (vykazovaly nižší hodnoty na mezi kluzu), nejhůře se umístila série vzorků stříhaných následně po kalení (tento trend byl všude stejný). Naopak k mírnému nárůstu $R_{p0,2}$ došlo u laseru, nejvíce pak u plazmy. Rozdíl mezi oběma extrémy je přibližně 8,3%. Největších změn bylo zaznamenáno při měření tažnosti A_{50mm} . Sada broušených vzorků vykazovala nejvyšší hodnoty tažnosti, nejhorší potom sada vzorků stříhaných po kalení, řezaných plazmou, laserem a těsně pod broušenou sérií vzorků se umístila série vzorků stříhaných před kalením. Rozdíl mezi oběma extrémy je 34%. Komplexní ukazatel tvařitelnosti **KUT** byl nejvyšší u broušené série vzorků, nejnižší dle předpokladu u stříhaných vzorků po kalení, následovala plazma, laser a technologie stříhání před kalením. Rozdíl mezi extrémy je 34,4%.

Zkoušku **rozšiřováním otvoru** doprovázely obdobné problémy jako u materiálu DOCOL 1200 M. U řezání pomocí laseru a plazmy docházelo opět ke vzniku vrubu a ke vzniku trhliny právě v důsledku tohoto vrubu. Minimálně výsledky z těchto dvou technologií jsou do značné míry zkresleny touto skutečností. Pro stříhané vzorky byl použit střížník, který zajistí střížnou vůli 24% tloušťky stříhaného materiálu. Právě při této vůli došlo u materiálu DOCOL 1200 M k největšímu rozšíření původního otvoru a tedy k největší tangenciální deformaci. Vychází se z předpokladu, že chování obou materiálů (vzhledem k jejich podobnému charakteru) je velmi podobné. Série broušených vzorků se z hlediska tangenciální deformace umístila opět nejvýše, naopak nejnižší je podle předpokladu série vzorků stříhaných po kalení, následuje plazma, stříhání před kalením a k broušeným vzorkům se nejvíce blíží sada připravovaná řezáním pomocí laseru. Rozdíl mezi oběma extrémy je 37,3%.

Výsledky zkoušky **tříbodovým ohybem** jsou velice podobné jako u materiálu DOCOL 1200 M. Ani u materiálu BTR 165 není pořadí technologií dle maximální deformace a po přepočtu dle normy stejné. Dle kritéria maximální deformace se oproti broušenému etalonu s vyšší deformací umístil pouze laser, nejnižší deformace byla dosažena opět u stříhané sady vzorků po kalení, následovala sada vzorků stříhaných před kalením a sada řezaná plazmou.

Rozdíl mezi oběma extrémy je **55,6%**. Dle korektnějšího kritéria, kde byly porovnávány velikosti deformace po přepočtu, vykazovala nejvyšší deformaci série broušených vzorků, následuje s těsným odstupem laser, série vzorků stříhaných před kalením, plazma a s nejnižší deformací opět technologie stříhání po kalení. Rozdíl mezi oběma extrémy je **54,4%**.

Poslední zkouška **rázem v ohybu** opět sledovala podobný trend jako u předešlého materiálu. Za povšimnutí stojí, že velikost rázové práce se výrazně mění pouze u technologie stříhání po kalení (v porovnání k ostatním technologiím). Rázová práce je u technologie broušení, řezání pomocí laseru a plazmy prakticky stejná (lze sledovat rozdíly řádově několik procent). Vzhledem k broušenému etalonu, který se v porovnání umístil nejvýše, je s nejmenší potřebnou prací na opačném konci technologie stříhání po kalení, následuje stříhání před kalením, laser a plazma. Rozdíl mezi oběma extrémy (tedy mezi vzorky připravenými stříháním po kalení a broušením) je **43,5%**.

Z gradientů mikrotvrdostí a struktur je opět dobře patrné, jaký vliv má konkrétní způsob dělení na strukturu a mechanické vlastnosti. Tvrdost materiálu BTR 165 po tepelném zpracování je přibližně 500 HV. Tak jako u předešlého materiálu i zde se potvrdily některé předpoklady. U **technologie broušení** můžeme opět prohlásit, že nedošlo k výraznému ovlivnění tvrdosti (je zde sice patrný mírný pokles tvrdosti na hraně, ale to mohlo být způsobeno malým úběrem při broušení, kde se následně projevil vliv předešlé technologie dělení). Na obr. 11.62. není patrná změna struktury. Poněkud překvapivě výsledky vykazala **technologie stříhání před tepelným zpracováním**. Dosažené výsledky výrazně předčily očekávání z hlediska velikosti dosažené deformace. Důvodem je výrazný pokles tvrdosti na hraně stříhaného materiálu. Pokles činil více jak 50% (tvrdost přibližně 200 HV). Na obr. 11.64. je vidět výrazné oduhličení střížné hrany, které vzniklo v důsledku deformačního zpevnění při stříhání a následným ohřevem na teplotu přibližně 950 °C. Tloušťka takto „odpevněné“ oblasti je přibližně 0,15 mm. Naopak **technologie stříhání po kalení** naprosto koresponduje s trendem u materiálu DOCOL 1200 M, kde v důsledku deformačního zpevnění střížné hrany došlo k nárůstu tvrdosti (přibližně na 710 HV), hloubka zpevněné oblasti je přibližně 0,2 mm. Na obr. 11.66. je dobře patrná deformační textura. Průběh mikrotvrdosti u **technologie řezání pomocí laseru** (obr. 11.68) je obdobný jako u materiálu DOCOL 1200 M. Zde došlo nejprve k mírnému nárůstu tvrdosti (600 HV ve vzdálenosti 0,05 mm od hrany) a následně k jejímu poklesu (350 HV ve vzdálenosti přibližně 0,12 mm od hrany). Celková šířka tepelně ovlivněné oblasti je u této technologie přibližně 0,4 mm. Šířka tepelně ovlivněné oblasti u **technologie řezání pomocí plazmy** (11.70.) je přibližně 0,5 mm. Došlo zde také k výraznějšímu nárůstu tvrdosti (narozdíl od materiálu DOCOL 1200 M) a to na hodnotu

přibližně 550 HV a následně k jejímu poklesu na přibližně 350 HV. Pro lepší názornost jsou v tab. 11.18. jsou uvedeny naměřené hodnoty týkající se vlastností sledované hrany (jedná se opět o průměrné hodnoty ze 3 měření).

Tab. 11.18. Vlastnosti hrany ovlivněné jednotlivými technologiemi (BTR 165)

BTR 165, tvrdost základního materiálu cca 500 HV				
Technologie	R _a [μm]	R _z [μm]	HV	hloubky ovlivněné oblasti [mm]
Broušeno	0,6	2,5	450 - 500	0,12
Stříháno před kalením + kaleno	0,9-2,5	6,4-14,6	200 - 500	0,15
Stříháno po kalení	2,2-2,8	11,5-19,3	500 - 710	0,2
Laser	1,9	11,6	350 - 600	0,4
Plazma	3,2	18,2	350 - 550	1,0

Stejně jako u materiálu DOCOL 1200 M i u BTR 165 je zaznamenán podobný trend. Pokud se zaměříme na hodnoty uvedené v tab. 11.18. a porovnáme drsnosti povrchu stříhaných vzorků po kalení se vzorky řezaných laserem zjistíme, že i zde je drsnost velice podobná. U sady vzorků stříhaných až po kalení je drsnost povrchu v porovnání s předešlým materiálem poněkud horší (díky vyšším mechanickým hodnotám), ovšem můžeme konstatovat, že tyto rozdíly jsou málo významné. Pokud opět provedeme přepočet rozdílu sledovaných veličin u těchto technologií dělení, zjistíme, že tyto rozdíly jsou mnohem větší než u materiálu DOCOL 1200 M. V kap. 12. tab. 12.4. jsou vyjádřeny tyto rozdíly v %, kde je tento rozdíl v rozmezí od 22,3 do 52,8% vždy ve prospěch laseru (v porovnání k technologii stříhání po tepelném zpracování a v závislosti na druhu zkoušky). V tab. 12.5. je porovnána technologie dělení pomocí laseru s technologií stříhání před tepelným zpracováním. Zde je naopak vidět, že tyto dvě technologie jsou z hlediska sledovaných veličin prakticky srovnatelné. Při pohledu na fotografie zachycující řez stříhaným vzorkem před deformací se opět při daném zvětšení nepotvrdilo, že by byl materiál porušen zárodečnými mikrotrhlinami. Stejně jako u předešlého materiálu i zde můžeme učinit závěr, že vliv drsnosti povrchu hrany má minimální vliv v porovnání s deformačním zpevněním okolí stříhu (platí pouze pro technologii stříhání po tepelném zpracování). U technologie stříhání před tepelným zpracováním s následným kalením došlo v důsledku deformačního zpevnění s následným ohřevem na přibližně 950 °C k výraznému poklesu tvrdosti na hraně, což mělo příznivý vliv na následné plastické vlastnosti.

12. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Z dílčích závěrů je dobře patrné, že z hlediska pevnostních charakteristik (R_m , $R_{p0,2}$) nemá technologie dělení podstatný vliv. Tato skutečnost byla zjištěna ze základní statické zkoušky tahem a pro další experimenty proto bylo upuštěno od měření maximální síly, ze které by bylo možno usoudit na změnu pevnostních charakteristik a zbytek experimentu byl věnován především měření (výpočtu) maximální deformace při dosažení mezního stavu. Vezmeme – li v úvahu, že vliv způsobu dělení je vždy jen lokální a ovlivňuje pouze velmi malou oblast v okolí řezu (stříhu), jeví se tento fakt jako málo významný (vzorky byly v porovnání s reálným výliskem nepoměrně menší - objem ovlivněného materiálu byl tedy vůči celkovému objemu zkušebního tělesa poměrně velký). Je tedy zřejmé, že u většího výlisku, kde bude objem ovlivněného materiálu vůči neovlivněnému ještě menší, bude změna mechanických vlastností výlisku jako celku prakticky nulová. To, co technologie dělení významně ovlivňuje, je zejména schopnost materiálu snášet plastickou deformaci. Pro přehlednější distribuci výsledků slouží následující tabulky zohledňující druh použité zkoušky, způsob dělení a rozdíl v % vyjadřující změnu mezi maximální a minimální dosaženou hodnotou (tažnost případně deformace) - viz tab. 12.1. a 12.3. Jako 100 % je pro výpočet uvažována vždy maximální naměřená hodnota a vůči ní je dopočítán rozdíl v %.

Tab. 12.1. Porovnání technologií z hlediska maximálního rozdílu preferované veličiny (ve prospěch broušení) pro DOCOL 1200 M

DOCOL 1200 M				
Zkouška	Preferovaná veličina	Technologie		Rozdíl [%]
		min.	max.	
Statická zkouška tahem	A_{50mm} [%]	stříháno	broušeno	19,3
Zkouška rozšiřováním otvoru	ϕ_t [-]	stříháno	broušeno	23,6
Tříbodový ohyb	ϕ [-]	stříháno	broušeno	34,7
Zkouška rázem v ohybu	KC [J/cm ²]	stříháno	broušeno	21

Výsledky uvedené v tab. 12.1. a 12.3. mají sice vypovídající hodnotu a u všech zkoušek je možné skutečně konstatovat, že vliv technologie na následné plastické vlastnosti je podstatný. Z praktického hlediska je však nutné říci, že hrana reálného výlisku nebude v praxi nikdy dokončována technologií broušení. Proto jsou v tab. 12.2. a 12.4. porovnávány 2 v praxi nejčastěji používané technologie přípravy plechových přístřihů - stříhání a řezání pomocí laseru, kde laser je uvažován jako 100%.

Tab. 12.2. Preferované technologie dělení a jejich vzájemný rozdíl (ve prospěch laseru) pro DOCOL 1200 M

DOCOL 1200 M				
Zkouška	Preferovaná veličina	Technologie		Rozdíl [%]
Statická zkouška tahem	$A_{50\text{mm}}$ [%]	stříháno	laser	16,6
Zkouška rozšiřováním otvoru	φ_t [-]	stříháno	laser	15,7
Tříbodový ohyb	φ [-]	stříháno	laser	33,6
Zkouška rázem v ohybu	KC [J/cm^2]	stříháno	laser	19,8

Tab. 12.3. Porovnání technologií z hlediska maximálního rozdílu preferované veličiny (ve prospěch broušení) pro BTR 165

BTR 165				
Zkouška	Preferovaná veličina	Technologie		Rozdíl [%]
		min.	max.	
Statická zkouška tahem	$A_{50\text{mm}}$ [%]	stříháno po	broušeno	34
Zkouška rozšiřováním otvoru	φ_t [-]	stříháno po	broušeno	37,3
Tříbodový ohyb	φ [-]	stříháno po	broušeno	54,4
Zkouška rázem v ohybu	KC [J/cm^2]	stříháno po	broušeno	43,5

Tab. 12.4. Preferované technologie dělení a jejich vzájemný rozdíl (ve prospěch laseru) pro BTR 165

BTR 165				
Zkouška	Preferovaná veličina	Technologie		Rozdíl [%]
Statická zkouška tahem	$A_{50\text{mm}}$ [%]	stříháno po	laser	22,3
Zkouška rozšiřováním otvoru	φ_t [-]	stříháno po	laser	33,3
Tříbodový ohyb	φ [-]	stříháno po	laser	52,8
Zkouška rázem v ohybu	KC [J/cm^2]	stříháno po	laser	37,9

Za povšimnutí stojí, že materiál BTR 165 je mnohem více citlivý na technologii dělení než DOCOL 1200 M. Je to zřejmě způsobeno vyššími mechanickými hodnotami a zvýšenou vrubovou citlivostí případně vyšší citlivostí na změnu struktury (a mechanických vlastností) vlivem dělení některou z „teplých“ technologií.

Tam, kde to technologický postup výroby umožňuje, se jednoznačně vyplatí dělit materiál BTR 165 technologií stříhání ještě před tím, než je materiál odlisován v nástroji. To lze v případě, že se obvod přístřihu podaří „odladit“ tak, že v další technologické operaci již nevyžaduje dodatečnou úpravu obvodu. V technické praxi se lze setkat s termínem označujícím tento postup jako lisování na „vychytávaný“ tvar. Tento postup výrazným způsobem zkracuje technologický postup a tím pádem i zlevňuje a zjednodušuje celou výrobu dílu. Rozdíl mezi technologií stříhání před kalením a po něm je tak výrazný, že pokud se přístřih připraví již před kalením, výsledné plastické vlastnosti se výrazně blíží broušení nebo řezání pomocí laseru (v případě statické zkoušky tahem je dokonce lepší než řezání laserem). Porovnání technologie stříhání před kalením a technologie přípravy pomocí laseru je v tab. 12.5. I zde je pro výpočet rozdílu v % uvažována nejvyšší hodnota jako 100 %.

Tab. 12.5. Porovnání technologie stříhání před kalením a dělení pomocí laseru pro BTR 165

BTR 165 – porovnání <i>Stříháno před kalením a Laser</i>			
Zkouška	Preferovaná veličina	Ve prospěch technologie	Rozdíl [%]
Statická zkouška tahem	$A_{50\text{mm}}$ [%]	stříhání před kalením	11
Zkouška rozšiřováním otvoru	ϕ_t [-]	laser	5,7
Tříbodový ohyb	ϕ [-]	laser	4
Zkouška rázem v ohybu	KC [J/cm ²]	laser	1,3

Z ekonomického hlediska jsou v porovnání s technologií stříhání všechny nekonvenční technologie méně produktivní. Uvážíme – li, že takt linky případně jednoúčelového automatu při dělení technologií stříhání se pohybuje řádově v jednotkách až stovkách za minutu, je u nekonvenčních technologií dělení produktivita několikanásobně nižší. Při přípravě přístřihů z oceli o tloušťce 2 mm nekonvenčními metodami (konkrétně vzorky v experimentální části práce) je rychlost řádově několik metrů za minutu. Při reálné velikosti přístřihu se tak může takt pohybovat v rozmezí několika minut (což je až o 2 řády horší výsledek v porovnání k technologii stříhání).

13. DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM

Cílem práce bylo zjistit vliv technologie dělení na následné plastické vlastnosti dvou martenzitických ocelí používaných v automobilovém průmyslu. Práce se soustředila především na rozdíly sledovaných veličin v rámci čtyř základních zkoušek (statická zkouška tahem, zkouška rozšiřováním otvoru, zkouška tříbodovým ohybem a zkouška rázem v ohybu).

Již v daleko menším měřítku zde však byla zkoumána například materiálová problematika (zejména změny struktury v ovlivněné oblasti). Domnívám se, že například podrobnější zkoumání změny struktury (tvar a velikost zrn, výskyt karbidů, podíly jednotlivých fází atd.) by pro řešenou problematiku bylo velkým přínosem a to zejména v případě „teplých“ technologií (v této práci laser a plazma), které vnáší do místa řezu velkou tepelnou energii. Dalším důležitým parametrem ovlivňující vhodnost konkrétní technologie dělení pro vybraný materiál je rozměr vzorků (především tloušťky plechu). V této práci měly oba zkoumané materiály (z důvodu možnosti vzájemného porovnání) tloušťku 2 mm. V technické praxi se samozřejmě používají materiály s různou tloušťkou, což by bylo vhodné zohlednit i pro další výzkum této problematiky. Zároveň by bylo přínosem také provedení únavových zkoušek materiálů za různých teplot.

Pro další hlubší výzkum vlivu technologie dělení na následné plastické vlastnosti materiálu by bylo jistě vhodné podrobit experimentálnímu zkoušení nejenom tyto aspekty řešení tohoto problému, ale např. také rozšíření tohoto testování o další skupiny materiálů používaných nebo vyvíjených ve strojírenském průmyslu. Výsledkem by pak byla určitá databáze vhodnosti jednotlivých technologií dělení pro příslušnou skupinu materiálů.

Jako další podnět pro zkoumání bych doporučil zatěžování jednoduché výztuhy (například prahu případně nárazníku) na ohyb. Polotovár pro výztuhu by byl připraven různými technologiemi dělení a výztuha by byla namáhána na ohyb až do mezního stavu. Výsledkem by byla maximální síla při porušení a úhel ohybu. V tomto případě (stejně jako u tříbodového ohybu) se nabízí možnost měřit logaritmickou deformaci pomocí bezkontaktních optických metod – např. systémem ARAMIS.

Na tomto místě je důležité zmínit, že při experimentech nebyl zohledněn vliv rychlosti zatěžování. Pro statickou zkoušku tahem, zkoušku tříbodovým ohybem a rozšiřování otvoru byly voleny relativně malé rychlosti zatěžování (od 10 mm/min až po 90 mm/min). Zkouška rázem v ohybu tak byla jedinou zkouškou, kde byla tato rychlost zatěžování výrazně vyšší (řádově 1000x). Pro další zkoumání řešené problematiky by tedy bylo vhodné hodnotit vliv různých rychlostí zatěžování na následné plastické vlastnosti testovaných materiálů pro větší počet zkoumaných vzorků.

14. ZÁVĚR

Podnět ke zkoumání problematiky vlivu technologie přípravy polotovaru s ohledem na následné plastické vlastnosti byl dán z několika důvodů. Jedním z nich byla potřeba prakticky ověřit domněnky o jeho významnosti (v technické praxi je nezanedbatelný) a zároveň se jedná o problematiku, která doposud nebyla podrobněji zkoumána. Tato skutečnost vedla k tomu, že se v praxi často experimentovalo a konkrétní problémy se řešily poměrně jednoduchou, ale neefektivní metodou pokus – omyl. Výsledky této disertační práce by měly přispět k zefektivnění výběru vhodné technologie přípravy a teoreticky i prakticky podložit vliv jednotlivých technologií dělení na následné plastické vlastnosti materiálu.

I přes to, že výběr testovaných materiálů byl zaměřen na stejnou skupinu (martenzitické oceli skupiny UHSS), lze konstatovat, že rozdíly mezi oběma materiály v rámci stejné technologie byly poměrně značné. Tato skutečnost byla dána zejména vyššími materiálovými hodnotami materiálu BTR 165. Z hlediska pořadí jednotlivých technologií dělení v rámci stejné zkoušky vykázaly oba materiály podobný trend. Zároveň se prokázalo, že technologie stříhání před tepelným zpracováním je u materiálů určených pro termomechanické zpracování velice perspektivní. V rámci vlivu na následné plastické vlastnosti je totiž tato technologie prakticky srovnatelná s technologií dělení pomocí laseru. U obou materiálů lze konstatovat, že sada broušených vzorků dosahovala z hlediska porovnávacího kritéria nejlepších výsledků. Naopak technologie stříhání vykazovala nejhorší výsledky v celém experimentu (u materiálu BTR 165 platí tato skutečnost pouze pro vzorky stříhané po tepelném zpracování). Také je třeba zdůraznit skutečnost, že technologie broušení, řezání pomocí laseru a plazmy jsou v rámci porovnávacího kritéria na podobné úrovni.

Statická zkouška tahem měla ověřit základní mechanické hodnoty testovaných materiálů (dle materiálových listů). Pro tento účel sloužila série **broušených vzorků**, která je pro korektní stanovení materiálových hodnot stanovena normou a zároveň slouží (i v případě ostatních technologií) jako srovnávací série - **etalon**. Zkouška měla zjistit vliv způsobu dělení na základní mechanické hodnoty. Ukázalo se, že oba materiály jsou z hlediska pevnostních hodnot ovlivněny pouze nepatrně. U materiálu **DOCOL 1200 M** došlo k nepatrnému nárůstu R_m a $R_{p0,2}$ pouze u série vzorků řezaných laserem. Tažnost A_{50mm} je zde nejvyšší u série broušených vzorků, nejnižší u technologie stříhání s rozdílem 19,3%. U materiálu **BTR 165** nedošlo k nárůstu R_m ani u jedné z technologií (vzhledem k broušenému etalonu). Došlo ale k nárůstu $R_{p0,2}$ u laseru a zejména plazmy. Tažnost (stejně jako u materiálu DOCOL 1200 M) zůstala opět nejvyšší u série broušených vzorků, nejhorší u stříhaných vzorků (u BTR 165 po kalení) s rozdílem 34%.

Pomocí zkoušky *rozšiřováním otvoru* bylo nejprve zjištěno, jaké střížná vůle je pro stříhání materiálů ze skupiny **UHSS** nejvýhodnější. Ukázalo se, že tato hodnota představuje přibližně 24% tloušťky stříhaného materiálu (což bylo potvrzeno i zpracovateli testovaných materiálů). Následně se zjišťoval vliv technologie na velikost tangenciální deformace. Bylo zjištěno, že oba testované materiály vykazují podobný trend. Nejvyšší tangenciální deformace bylo dosažení u série broušených vzorků, nejnižší (dle předpokladu) u stříhané série (u **BTR 165** po kalení). U materiálu **DOCOL 1200 M** činí tento rozdíl 23,6%, u materiálu **BTR 165** dokonce 37,3%. V průběhu měření této zkoušky byla zjištěna skutečnost, že technologie řezání pomocí laseru a plazmy zanechává při uzavřené trajektorii řezu v místě napojení vrub, který nepříznivě ovlivňuje následné plastické vlastnosti. Proto je vhodné tento vrub situovat do míst s předpokládanou malou nebo nulovou deformací.

Pro zkoušku *tříbodovým ohybem* byl zkonstruován speciální nástroj umožňující namáhat testovaný vzorek ohybem (pásek plechu) na výšku – testovaná hrana je tak vystavena tahovému namáhání. Velikost dosažené deformace po dosažení mezního stavu se mezi jednotlivými technologiemi přípravy poměrně značně lišila a právě u této zkoušky byl zaznamenán největší rozdíl v dosažené deformaci. To bylo dobře patrné i z úhlu ohybu především mezi technologií broušení a stříhání (u **BTR 165** po kalení). U materiálu **DOCOL 1200 M** je rozdíl mezi těmito technologiemi 34,7%, u materiálu **BTR 165** dokonce 54,4%. Tyto hodnoty lze považovat za relevantní (i když velikosti dosažené logaritmické deformace jsou poměrně vysoké), protože data byla naměřena bezkontaktním systémem **ARAMIS**, který snímá reálnou deformaci na deformovaném vzorku.

Zkouška *rázem v ohybu* byla jedinou zkouškou zohledňující vyšší rychlost zatěžování. Mezi technologiemi dělení pomocí laseru, plazmy a broušení (u materiálu **BTR 165** ještě technologie stříhání před kalením) jsou dosahované hodnoty rázové práce velmi vyrovnané. Maximálního rozdílu je dosaženo opět mezi technologií broušení a technologií stříhání (u **BTR 165** po kalení). U materiálu **DOCOL 1200 M** je tento rozdíl 21%, u **BTR 165** dokonce 43,5%. Na základě této zkoušky lze učinit závěr, že s vyšší rychlostí zatěžování vzorku klesá náchylnost materiálu na vliv technologie dělení. Je nutno si však uvědomit, že tato rychlost byla řádově 1000x vyšší než rychlost u ostatních zkoušek. V praxi je tedy taková rychlost při běžných způsobech zpracování nereálná. Dává však dobrou představu o chování materiálu při rychlostech, které jsou dosahovány při Crash Testech.

Z rozboru jednotlivých zkoušek lze učinit následující nejdůležitější závěry:

- Materiál **DOCOL 1200 M** je méně náchylný na změnu mechanických vlastností, ale i na vliv technologie dělení než materiál **BTR 165**. Uvážíme –li, že druhý zmiňovaný materiál má vyšší mechanické hodnoty, lze v tomto případě konstatovat, že se zvyšujícími se mechanickými hodnotami se zvětšuje i vliv technologie na následné plastické vlastnosti i mechanické hodnoty.
- Rozdíly v hodnotách sledovaných veličin mezi technologiemi broušení a stříhání jsou u materiálu DOCOL 1200 M mezi 19,3 a 34,7%, u materiálu BTR 165 dokonce mezi 34 a 54,4%. Jen nepatrně menší rozdíl je mezi nejpoužívanějšími technologiemi přípravy plechových přístřihů, tedy technologií stříhání a dělení pomocí laseru. Lze tedy konstatovat, že **vliv technologie dělení na následné plastické vlastnosti materiálu je významný.**
- Pro přípravu plechových přístřihů z materiálů skupiny UHSS v hromadné výrobě lze jednoznačně doporučit řezání pomocí laseru, u rovných a dlouhých řezů i plazmu. Materiály určené pro termomechanické zpracování lze s výhodou efektivně připravovat před tepelným zpracováním technologií stříhání. Pro materiál již termomechanicky zpracovaný platí obdobné doporučení, jako v předešlém případě.
- Pro další výzkum této problematiky by bylo vhodné zaměřit se na rozbor struktury v ovlivněné oblasti (zejména u „teplých“ technologií) a zhodnotit vliv tloušťky materiálu na následné plastické vlastnosti. Dále by bylo vhodné rozšířit materiálovou základnu (nejen materiály skupiny UHSS) pro vytvoření databáze materiálů. Jistě zajímavým přínosem by bylo testování reálného výlisku na ohyb. V neposlední řadě doporučuji se podrobněji věnovat testování vlivu rychlosti zatěžování na následné plastické vlastnosti materiálů.

15. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] <http://www.periskop.cz/cz/clanky/general-motors-intenzivne-pracuje-na-vyvoji-automobilu-budoucnosti/>
- [2] <http://www.hybrid.cz/tagy/mazda>
- [3] MM Průmyslové spektrum: Inovativní technologie v automobilovém průmyslu, [10/2007]
www.mmspektrum.com/clanek/inovativni-technologie-v-automobilovem-prumyslu
- [4] BUCHAR, Z. NEUMANN, H. MRNA, L.: Hodnocení tvařitelnosti svařovaných nástřihů pro stavbu karosérií. Technická univerzita v Liberci. Technologické centrum a.s. Brno.
- [5] DOUBEK, P.: Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace. Disertační práce. TU Liberec 2006.
- [6] MM Průmyslové spektrum: Tailored blanks, [08.01.2008]
<http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-tailored-blanks>
- [7] Petrol CZ: ULSAC [10.01.2008]
<http://www.petrol.cz/noviny/clanek.asp?id=2032>
- [8] Thyssen Krupp: Tailored Blanks, [29.11.2007]
<http://www.thyssenkrupptailoredblanks.it/default.asp?page=7&titolo=1&lingua=inglese>
- [9] World Auto Steel: ULSAB, [08.01.2008]; <http://www.ulsab.org>
- [10] MM Průmyslové spektrum: Sendvičové konstrukce, [08.01.2008]
<http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce>
- [11] KRÍŽ, V.-VÁVRA, P.: Strojírenská příručka, svazek 3, J – Materiál a jeho zkoušení, SCIENTIA, spol. s r.o., Praha, 1993, str 145-191, ISBN 80-85827-23-9.
- [12] www.thyssenkrupp.de (3.2.2006)
- [13] Studijní materiály vydané katedrou strojírenské technologie. TU Liberec 2005
- [14] www.atlas-spaceframe.de (18.3.2006)
- [15] PTÁČEK, L. a kol. Nauka o materiálu II, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. ISBN: 80-7204-248-3.
- [16] Konstrukční oceli, Doc. Ing. Přemysl Fremunt CSc., Doc. Ing. Tomáš Podrábský CSc., Akademické nakladatelství CERM, 1996, Brno. ISBN 80-858667-95-8.
- [17] SOBOTKA, J.: Hodnocení mechanických vlastností nových vysokopevnostních materiálů, Disertační práce, TUL, Liberec, 2008. ISBN 978-80-7372-441-2.
- [18] European Automatic Supplier Conference, Processing state-of-the-art-multi-phase steels, září 2004.
- [19] PLUHAŘ, J. a kol. Nauka o materiálech, Praha: SNTL, 1989

- [20] PORSCHE Engineering Service Inc.: 7. Materiál And Processes.
- [21] B.C. De COOMAN, International conference on trip-aided high strenght Ferdouš alloys, Antwerp: Technical institut VZW, červen 2002.
- [22] JÍRA M.: Úspora hmotnosti automobilové karoserie použitím vysokopevnosních plechů, Diplomová práce, Liberec: TUL, 1998.
- [23] FOREJT, M.: Teorie tváření a nástroje, Brno, 1991. ISBN 80-214-0294-6
- [24] ŠAFAŘÍK, M.: Nástroje pro tváření kovů a plastů, Liberec 1991, ISBN 80-7083-014-X
- [25] <http://ttcgroup.eu/stroje/resato/stroje-na-rezani-vodnim-paprskem/>
- [26] <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
- [27] MM Průmyslové spektrum: Lasery pro průmysl, [č.7,8 - 2008]
- [28] <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/lasery/index.html>
- [29] <http://www.hstcebora.cz/odborna-sekce/>
- [30] <http://www.google.cz/search?hl=cs&q=%C5%A1%C3%AD%C5%99en%C3%AD+trhliny+v+kovech&btnG=Hledat&lr=>
- [31] ASHBY, M.F.: Materials Selection in Mechanical Design, Pergamon Press, Oxford, 2005, ISBN 0-7506-6168-2
- [32] HERTZBERG, R.W.: Deformation and fracture mechanics of engineering materials, John Wiley & Sons, New York, 1996, ISBN 0-471-01214-9
- [33] MORAVEC, J.: Analýza kritických míst svařovacího procesu na základě simulací v programu SYSWELD. Liberec, 2008. ISBN 978-80-7372-315-6.
- [34] Zkouška tahem pro kovové materiály, Norma, 2004, ČSN EN 10002-1.
- [35] Aktualizace názvů a označování nových parametrů, Statická zkouška tahem, Norma, 2007, ČSN EN 10002-1.
- [36] Jiří Petruželka, Richard Březina: Tvářitelnost kovových materiálů. Technická univerzita Ostrava, 2001.
- [37] Aktualizace názvů a označování mechanických parametrů, Rázové zkoušky v ohybu, Norma, 2007, ČSN EN 10045-1.
- [38] SSAB: Docol, [29.11.2007]
http://www.ssabdirect.com/templates/ArticlePage____6248.aspx
- [39] <http://radekmusalek.com/Files/Radek%20Musalek%20-%20SEMDOK2007.pdf>
- [40] <http://www.google.cz/search?hl=cs&q=%C5%A1%C3%AD%C5%99en%C3%AD+trhliny+v+kovech&btnG=Hledat&l>
- [41] www.benteler.com
- [42] www.gom.com

16. SEZNAM PUBLIKACÍ K DANÉ PROBLEMATICE

- [1] LUŇÁČEK, M.: Influence of element size on distribution of deformation in surround of rupture during forming high-strength sheet metal. In: Mezinárodní Baťova doktorandská konference. 12.4.2007 Zlín (Recenzovaný sborník), s. 257 (CD). ISBN 978-80-7318-529-9
- [2] LUŇÁČEK, M. – NĚMEČKOVÁ, K.: The element size of deformation mesh and its influence on the distribution of deformation. In: Technologia 2007, 19.-20.9.2007, Bratislava: STU v Bratislavě, 2007. S.77 (CD), ISBN 978-80-227-2712-9
- [3] LUŇÁČEK, M.: Influence of unconventional methods of preparation of semi-finished materials on their subsequent plastic characteristics. ICTKI 2008, 23-25.1.2008, UJEP Ústí nad Labem, Ústí nad Labem, ČR, CD, ISBN 978-80-7044-969-1
- [4] LUŇÁČEK, M. - KOLNEROVÁ, M.: Test of high-strength sheets by 3-point bending. In: Acta Mechanica Slovaca, PRO-TECH-MA 2008, 6.7.-8.7.2008, TU v Košiciach-Strojnická fakulta, Košice 2008, ISSN 1335-2393
- [5] LUŇÁČEK, M.: Resulting plastic properties of high-strength blanks prepared by unconventional cutting methods. Sborník příspěvků. Mezinárodní Baťova doktorandská konference 2008, 12.4. 2008, Zlín, ISBN 978-80-7318-663-0 (CD ISBN 978-80-7318-664-7)
- [6] LUŇÁČEK, M. Comparison of unconventional preparation methods for high – strength steels. In: 10. Mezinárodní konference Technológia 2007, 19.-20.9. 2007, Bratislava: STU v Bratislavě. 2007, SR, s.82 CD. ISBN 978-80-227-2712-9
- [7] LUŇÁČEK, M.: Přípravek pro statickou zkoušku tříbodovým ohybem, zejména pro zkoušení vysokopevnostních plechů. Užité vzor: PUV 2009-21728. Podáno 23.9.2009



17. SEZNAM PŘÍLOH

1. Materiálové listy **DOCOL 1200** a **BTR 165**
2. Protokoly ze statické zkoušky tahem
3. Protokoly ze zkoušky tříbodovým ohybem
4. Grafické výsledky zkoušky tříbodovým ohybem
5. Výkresová dokumentace



Materiálové listy **DOCOL 1200** a **BTR 165**

(Příloha č. 1)

**Chemické složení a mechanické hodnoty skupiny materiálu DOCOL**

DOCOL®	C (%) typical	Si (%) typical	Mn (%) typical	P (%) typical	S (%) typical	Al (%) typical	Nb (%) typical	Ti (%) typical
Docol 500 LA	0,06	0,40	1,20	0,010	0,004	0,04	0,060	-
Docol 500 DP	0,08	0,30	0,65	0,010	0,010	0,04	-	-
Docol 500 DL	0,05	0,20	1,50	0,010	0,002	0,04	-	-
Docol 600 DP	0,11	0,40	0,90	0,010	0,002	0,04	-	-
Docol 600 DL	0,10	0,40	1,50	0,010	0,002	0,04	-	-
Docol 800 DP	0,13	0,20	1,50	0,015	0,002	0,04	0,015	-
Docol 800 DL	0,14	0,20	1,50	0,015	0,002	0,04	0,015	-
Docol 1000 DP	0,15	0,50	1,50	0,015	0,002	0,04	0,015	-
Docol 1000 DP + ZE	0,15	0,50	1,50	0,015	0,002	0,04	0,015	-
Docol 1200 M	0,11	0,20	1,60	0,015	0,002	0,04	0,015	-
Docol 1200 M + ZE	0,12	0,20	1,50	0,015	0,002	0,04	-	0,035
Docol 1400 M	0,17	0,50	1,60	0,015	0,002	0,04	0,015	-
Docol 1400 M + ZE ¹⁾	0,18	0,20	1,20	0,015	0,002	0,04	-	0,035
Docol Roll 800	0,15	0,50	1,50	0,010	0,002	0,04	0,015	-
Docol Roll 1000	0,17	0,20	1,50	0,010	0,002	0,04	0,015	-

DOCOL®	Yield strength		Yield strength after bake hardening	Tensile strength		Elongation		Minimum bending radius		
	R_{0,2} (N/mm²)		R_{0,2} + BH ¹⁾ (N/mm²)	R_m (N/mm²)		A₅ (%) t<3 mm	A₅ (%) t≥3 mm	t ≤ 2 mm	2 < t ≤ 3 mm	
	min	max	min	min	max	min	min	min	min	
Docol 500 LA	500	620	-	570	710	12		1,0 x t	1,0 x t	
Docol 500 DP	290	370	400	500	600	20		0 x t		
Docol 500 DL	230	300	350	500	600	24		0 x t		
Docol 600 DP	350	450	500	600	700	16		0 x t		
Docol 600 DL	280	360	420	600	700	20		0 x t		
Docol 800 DP	500	650	650	800	950	10		1,0 x t		
Docol 800 DL	390	540	550	800	950	13		1,0 x t		
Docol 1000 DP	700	950	850	1000	1200	7		3,0 x t		
Docol 1000 DP + ZE	700	950	850	1000	1200	7		3,0 x t		
Docol 1200 M	950		1150	1200	1400	3		4,0 x t		
Docol 1200 M + ZE	950		1150	1200	1400	3		4,0 x t		
Docol 1400 M	1150		1350	1400	1600	3		4,0 x t		
Docol 1400 M + ZE ¹⁾	1150		1350	1400	1600	3		4,0 x t		
Docol Roll 800	600	750	-	800	950	8		0,9 x t		
Docol Roll 1000	850	1100	-	1000	1200	5		1,5 x t		

**Chemické složení a mechanické hodnoty materiálu BTR 165**

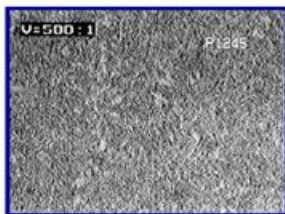
Prvek	C	Si	Mn	P	S	Al	B	Cr	Cu	Ni	Ti	Mo
min.[%]	0,22	0,2	1,2			0,02	0,002	0,1			0,02	
max.[%]	0,25	0,3	1,4	0,02	0,01	0,06	0,0035	0,2	0,1	0,3	0,05	0,35

Benteler Stahl/Rohr**Werkstoffe VI****Wasservergütbare Stähle**

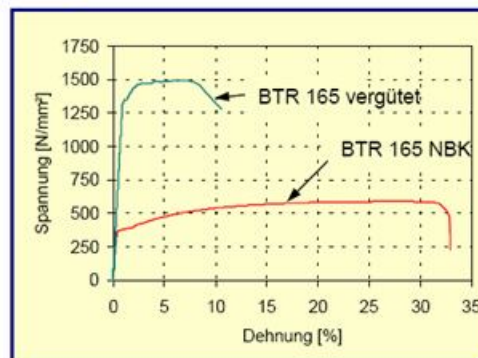
Stahl	R _m	R _{eS}	A ₅	Anwendung
BTR 165 NBK soft	> 500 N/mm ²	> 400 N/mm ²	> 30 %	Werkstoff mit sehr guter Umformbarkeit zum Vergüten geeignet
BTR 165 vergütet	>1400 N/mm ²	>1100 N/mm ²	> 8 %	Höher beanspruchte Teile im Sicherheitsbereich Fertigung: IHU im Zustand NBK-soft → Vergüten des umgeformten Teils

**NBK soft**

- speziell für Umformung
geeignete Wärmebehandlung
- Ferritisch-perlitisches Gefüge

**Vergütet**

- Gefüge aus angelas-
senem Martensit
- auch große Wanddicken
vollständig durchvergütet





Protokoly ze statické zkoušky tahem

(Příloha č. 2)



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DOCOL 1200 M - broušeno

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min

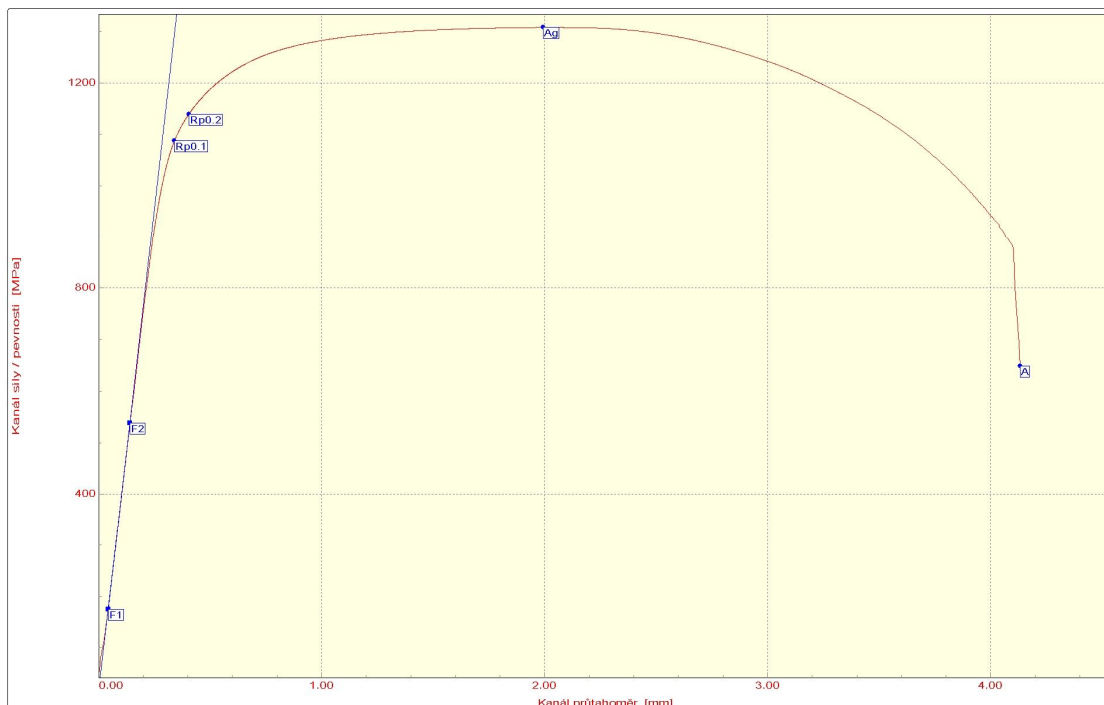
Směr odebrání vzorku: : 0°

Datum zkoušky: : 25.3.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
1	1087.54	1139.05	1307.40	7.92	3.29	184234.64
2	1085.76	1129.01	1287.70	8.16	3.73	176757.58
3	1079.00	1123.17	1284.67	7.44	3.10	192059.97
4	1078.42	1126.53	1290.52	8.02	3.46	202002.03
5	1086.56	1127.72	1287.80	7.67	3.29	225058.64
6	1070.46	1121.16	1287.42	7.79	3.26	182286.02

Statistická hodnota	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	1081.29	1127.77	1290.92	7.83	3.35	193733.14
Směrodatná odchylka	6.60	6.25	8.29	0.26	0.22	17674.21
Minimální hodnota	1070.46	1121.16	1284.67	7.44	3.10	176757.58
Maximální hodnota	1087.54	1139.05	1307.40	8.16	3.73	225058.64





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

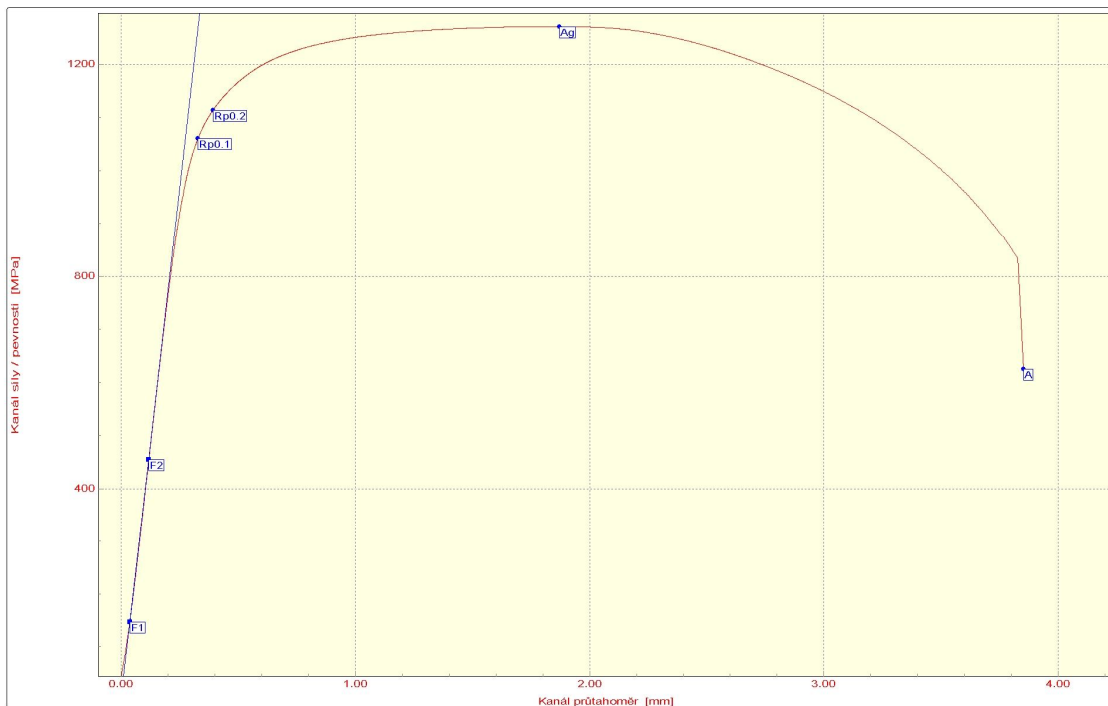
Testovaný materiál: : DOCOL 1200 M - broušeno
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 45°
Datum zkoušky: : 25.3.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
1	1060.74	1114.00	1271.03	7.38	3.08	213159.31
2	1124.39	1156.18	1281.81	7.62	2.45	177846.97
3	1078.16	1124.38	1268.95	7.46	2.91	201560.44
4	1124.61	1159.03	1287.00	6.94	2.57	194531.56
5	1109.13	1154.65	1299.13	7.60	3.06	168960.00
6	1074.41	1125.97	1260.91	7.04	2.11	210812.61

Statistická hodnota	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	1095.24	1139.03	1278.14	7.34	2.70	194478.48
Směrodatná odchylka	27.64	19.75	13.89	0.29	0.38	17853.48
Minimální hodnota	1060.74	1114.00	1260.91	6.94	2.11	168960.00
Maximální hodnota	1124.61	1159.03	1299.13	7.62	3.08	213159.31



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DOCOL 1200 M - broušeno

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min

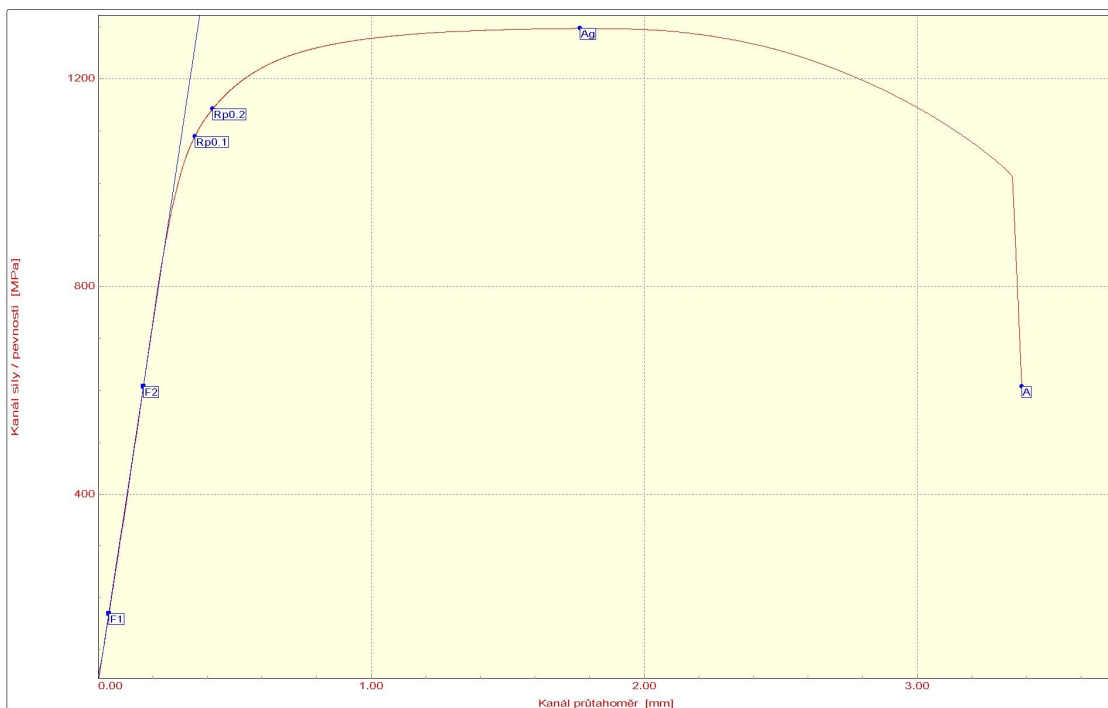
Směr odebrání vzorku: : 90°

Datum zkoušky: : 25.3.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
1	1053.12	1117.21	1277.12	6.58	2.81	181407.08
2	1092.86	1134.78	1271.22	6.01	2.41	182042.06
3	1072.06	1128.00	1277.62	6.72	1.75	179642.52
4	1089.71	1142.80	1297.09	6.43	2.80	168141.45
5	1080.08	1133.88	1286.16	6.34	2.42	171963.64
6	1103.05	1149.96	1295.00	6.80	2.81	163267.66

Statistická hodnota	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	1081.81	1134.44	1284.03	6.48	2.50	174410.73
Směrodatná odchylka	17.64	11.39	10.47	0.29	0.41	7797.66
Minimální hodnota	1053.12	1117.21	1271.22	6.01	1.75	163267.66
Maximální hodnota	1103.05	1149.96	1297.09	6.80	2.81	182042.06



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DOCOL 1200 M - stříháno

Norma: : ČSN EN 10002-1

Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min

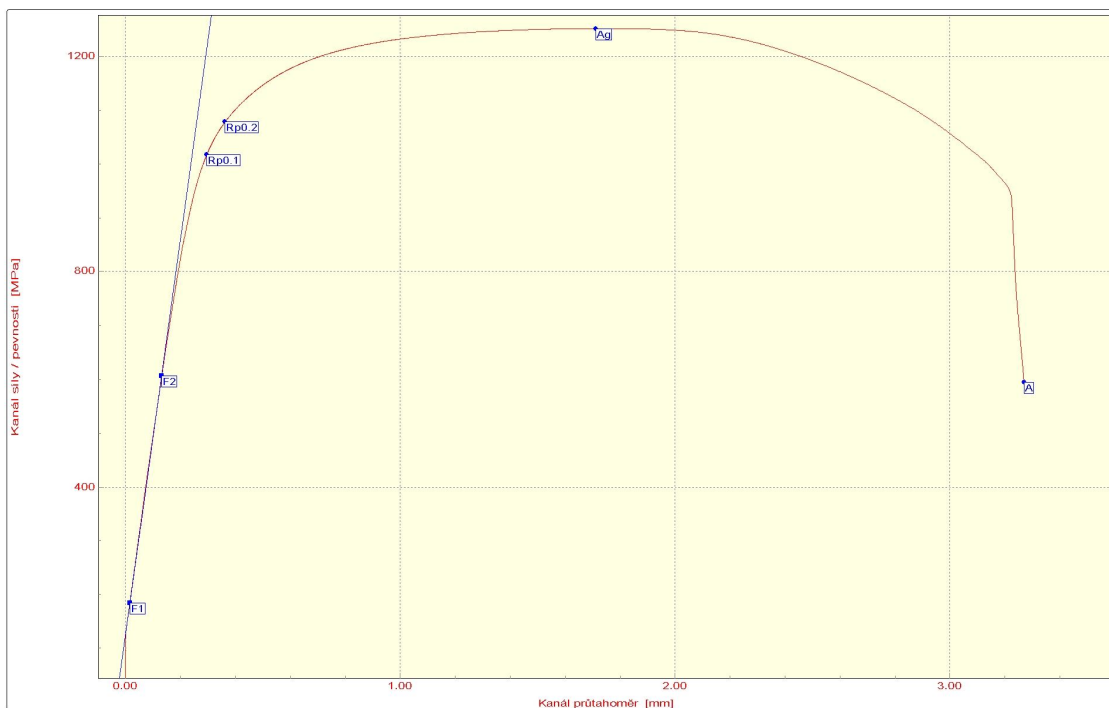
Směr odebrání vzorku: : 0°

Datum zkoušky: : 27.3.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
1	1046.30	1099.13	1268.36	6.56	3.19	187052.53
2	1081.36	1129.21	1293.22	5.85	2.81	191873.52
3	1017.98	1078.28	1251.17	6.28	2.80	199305.67
4	1030.23	1092.85	1276.48	5.84	2.78	181020.80
5	1060.61	1111.14	1283.15	6.67	3.17	176053.38
6	1047.10	1103.88	1281.65	6.69	3.13	157072.97

Statistická hodnota	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	1047.26	1102.41	1275.67	6.32	2.98	182063.14
Směrodatná odchylka	22.31	17.21	14.52	0.39	0.20	14697.99
Minimální hodnota	1017.98	1078.28	1251.17	5.84	2.78	157072.97
Maximální hodnota	1081.36	1129.21	1293.22	6.69	3.19	199305.67



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DOCOL 1200 M - laser

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min

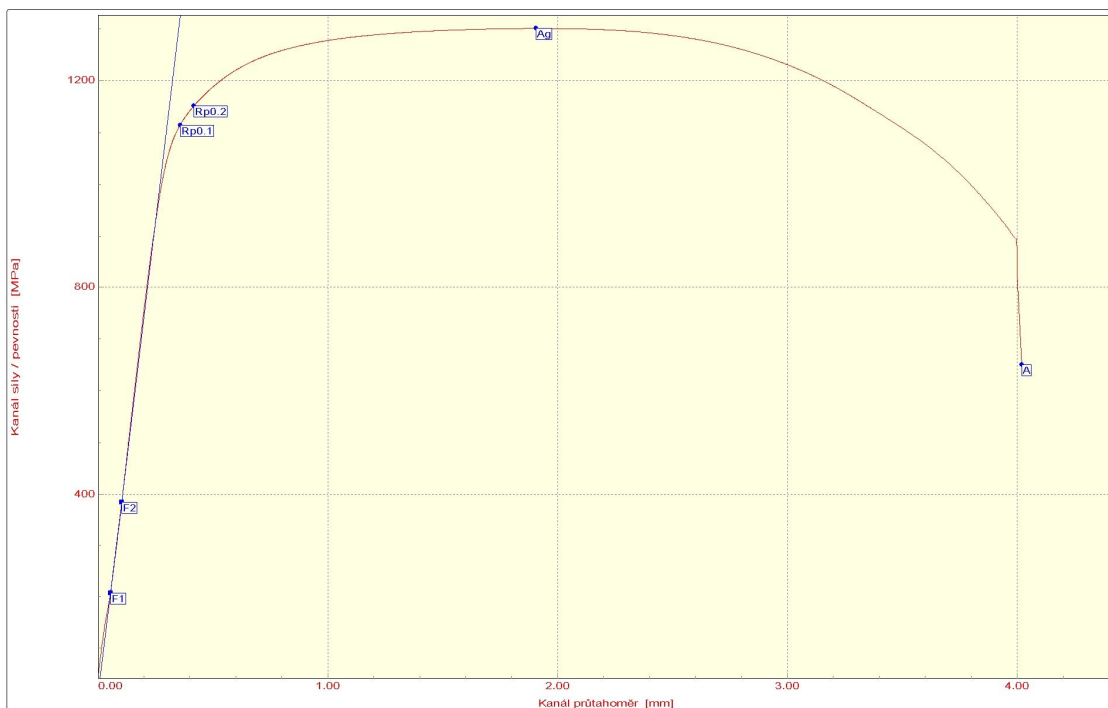
Směr odebrání vzorku: : 0°

Datum zkoušky: : 25.3.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
1	1045.49	1119.35	1294.95	7.22	3.17	202681.27
2	1080.18	1139.33	1312.50	7.37	3.18	194204.50
3	1067.04	1142.91	1328.04	7.75	3.27	196778.91
4	1118.75	1167.44	1318.34	7.92	3.48	193931.55
5	1071.44	1127.84	1297.85	7.50	3.28	211532.86
6	1114.60	1151.47	1300.81	7.68	3.09	186637.67

Statistická hodnota	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	1082.92	1141.39	1308.75	7.58	3.25	197627.80
Směrodatná odchylka	28.57	17.06	13.04	0.26	0.13	8553.05
Minimální hodnota	1045.49	1119.35	1294.95	7.22	3.09	186637.67
Maximální hodnota	1118.75	1167.44	1328.04	7.92	3.48	211532.86



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DOCOL 1200 M - plazma

Norma: : ČSN EN 10002-1

Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min

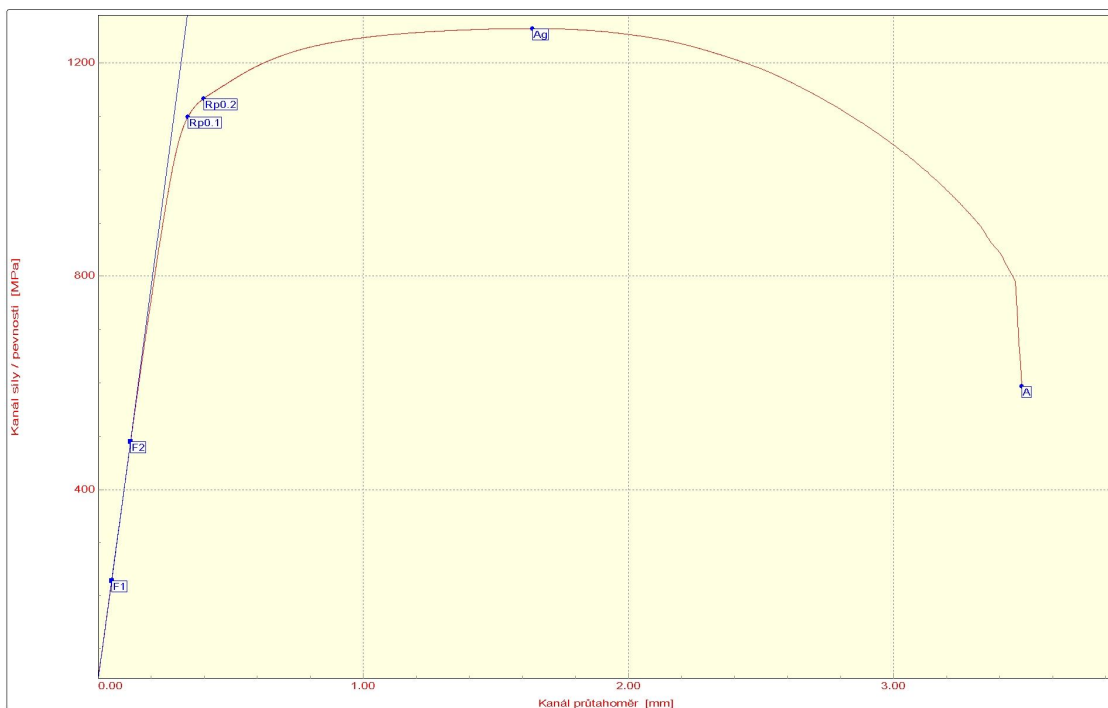
Směr odebrání vzorku: : 0°

Datum zkoušky: : 25.3.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
1	1083.12	1125.97	1272.99	6.73	2.54	184642.42
2	1036.76	1091.04	1252.76	6.73	2.60	130573.96
3	1098.81	1133.11	1263.96	6.66	2.61	192349.73
4	1101.78	1129.85	1261.11	6.78	2.58	182594.59
5	1100.13	1136.03	1278.47	6.38	2.52	203102.38
6	1072.79	1122.68	1263.10	6.32	2.51	220720.00

Statistická hodnota	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	1082.23	1123.11	1265.40	6.60	2.56	185663.84
Směrodatná odchylka	25.04	16.43	9.10	0.20	0.04	30407.55
Minimální hodnota	1036.76	1091.04	1252.76	6.32	2.51	130573.96
Maximální hodnota	1101.78	1136.03	1278.47	6.78	2.61	220720.00





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

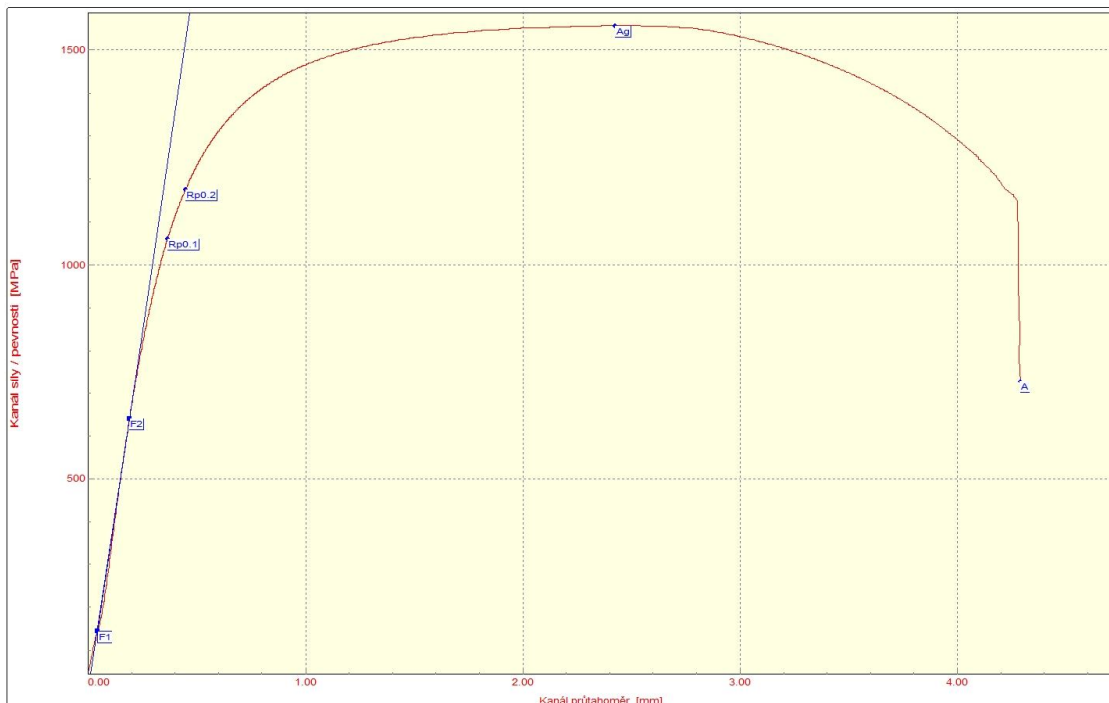
Testovaný materiál: : BTR 165 - broušeno
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 6.4.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
1	1080.85	1175.21	1556.24	8.15	3.93	163806.61
2	1010.84	1140.57	1546.89	7.81	3.93	192210.55
3	1035.21	1160.59	1552.83	8.42	3.44	184899.77
4	998.59	1122.35	1524.23	7.72	3.91	185598.91
5	1030.90	1144.23	1535.22	9.04	4.33	170446.33
6	1024.51	1147.33	1551.88	8.32	4.05	187870.89

Statistická hodnota	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	1026.81	1148.38	1544.55	8.24	3.93	180805.50
Směrodatná odchylka	21.46	18.03	12.36	0.48	0.29	11099.63
Minimální hodnota	998.59	1122.35	1524.23	7.72	3.44	163806.61
Maximální hodnota	1080.85	1175.21	1556.24	9.04	4.33	192210.55





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

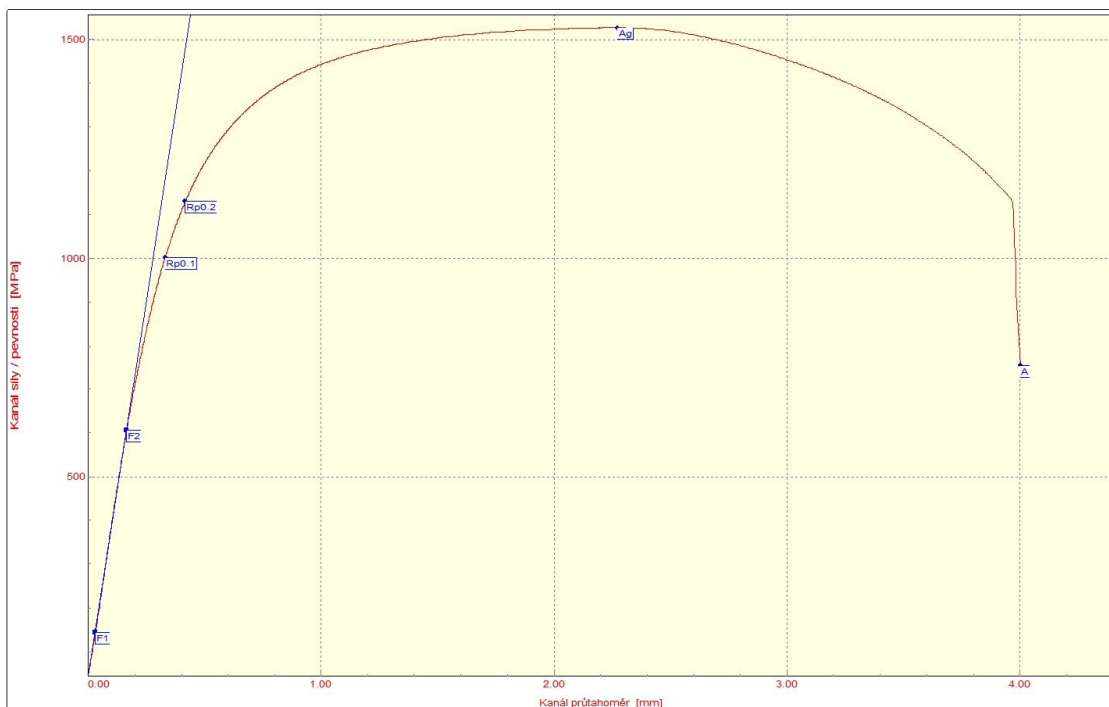
Testovaný materiál: : BTR 165 - broušeno
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 45°
Datum zkoušky: : 6.4.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
1	961.45	1084.18	1455.76	7.02	2.59	186801.98
2	986.25	1106.65	1489.68	6.76	2.95	185249.58
3	1026.00	1146.66	1525.95	7.69	3.77	180840.83
4	1001.52	1130.08	1525.71	7.59	3.68	180054.19
5	984.80	1117.19	1529.10	7.78	3.59	184527.78
6	988.58	1114.30	1512.81	6.66	3.42	163533.45

Statistická hodnota	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	991.43	1116.51	1506.50	7.25	3.34	180167.97
Směrodatná odchylka	21.33	21.17	28.83	0.49	0.47	8555.86
Minimální hodnota	961.45	1084.18	1455.76	6.66	2.59	163533.45
Maximální hodnota	1026.00	1146.66	1529.10	7.78	3.77	186801.98





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

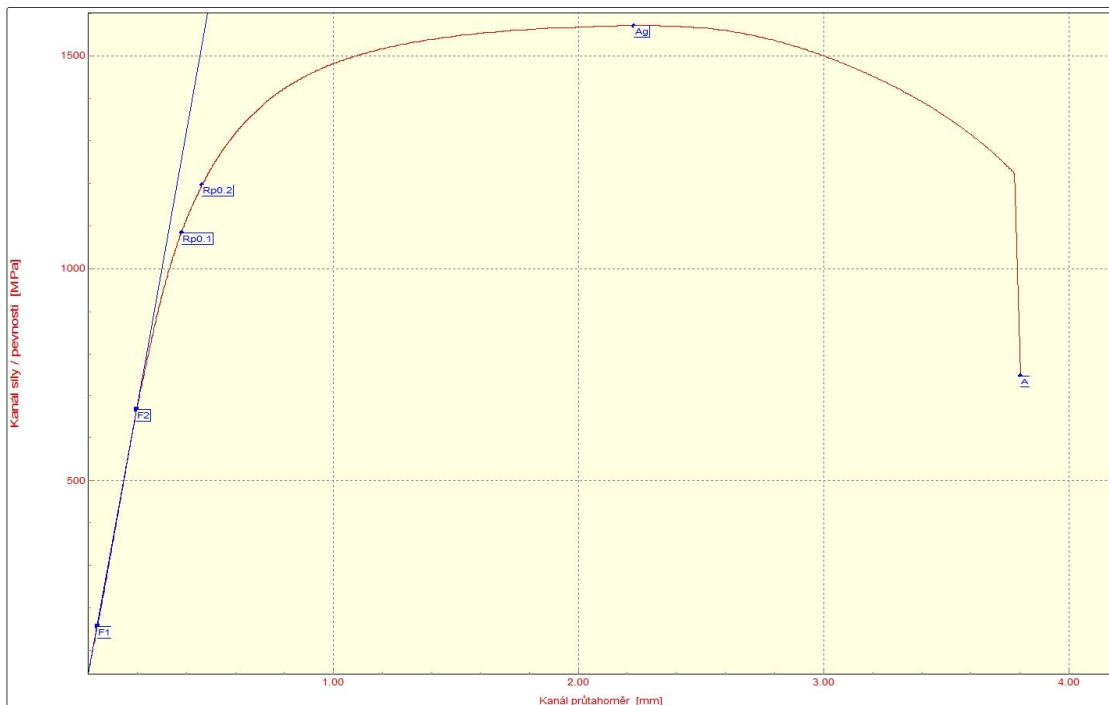
Testovaný materiál: : BTR 165 - broušeno
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 90°
Datum zkoušky: : 6.4.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
1	1052.11	1185.83	1587.39	7.38	3.68	174368.31
2	1059.74	1188.10	1580.96	6.96	3.57	181385.81
3	1087.42	1201.13	1566.48	7.09	3.46	150054.17
4	1020.68	1154.79	1566.84	6.76	3.30	180862.70
5	1017.45	1143.71	1544.65	7.38	3.67	175136.19
6	1084.77	1197.03	1570.34	7.16	3.49	148617.80

Statistická hodnota	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	1053.69	1178.43	1569.44	7.12	3.53	168404.16
Směrodatná odchylka	30.15	23.55	14.74	0.24	0.14	15052.26
Minimální hodnota	1017.45	1143.71	1544.65	6.76	3.30	148617.80
Maximální hodnota	1087.42	1201.13	1587.39	7.38	3.68	181385.81





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

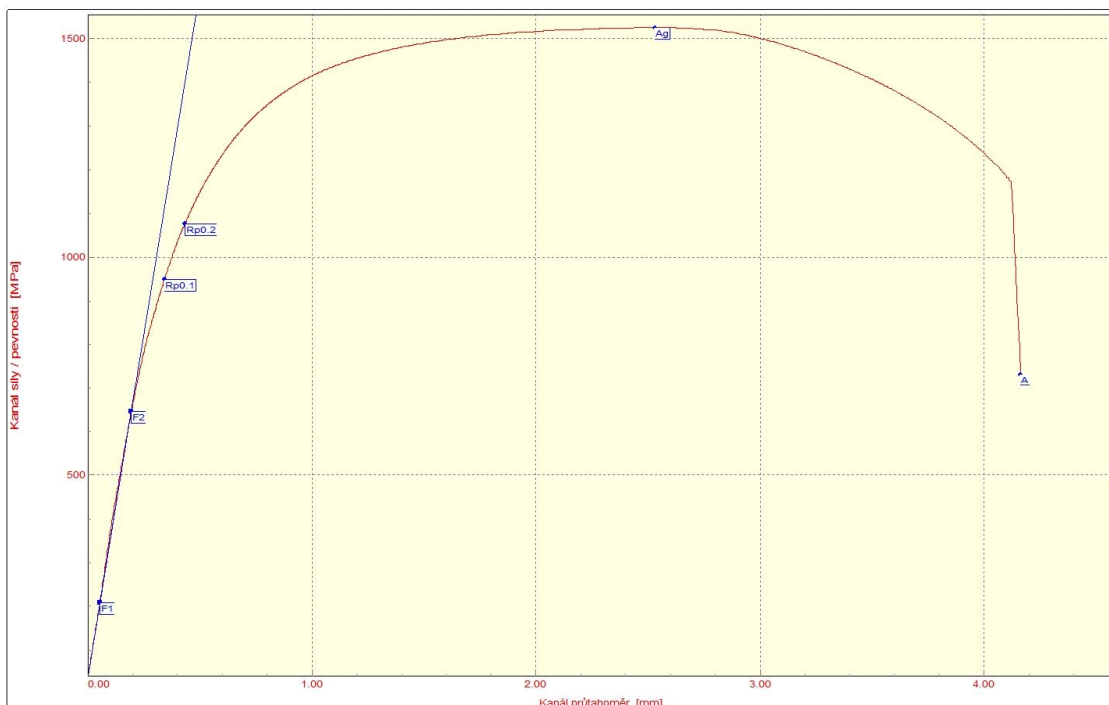
Testovaný materiál: : BTR 165 - stříháno před kalením
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 6.4.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
1	1058.29	1188.36	1586.27	7.73	4.02	141642.92
2	949.83	1076.40	1524.03	7.88	4.11	138481.34
3	971.33	1090.68	1495.05	8.13	4.09	146075.58
4	968.54	1082.38	1479.90	7.91	3.78	130428.74
5	1050.55	1186.41	1581.05	7.17	3.59	151096.30
6	994.58	1113.03	1521.53	8.39	4.35	157475.00

Statistická hodnota	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	998.85	1122.88	1531.31	7.87	3.99	144199.98
Směrodatná odchylka	45.40	51.50	43.82	0.41	0.27	9551.88
Minimální hodnota	949.83	1076.40	1479.90	7.17	3.59	130428.74
Maximální hodnota	1058.29	1188.36	1586.27	8.39	4.35	157475.00



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: BTR 165 - stříháno po kalení

Norma: ČSN - EN 10002-1

Vypracoval: Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: 10 mm/min

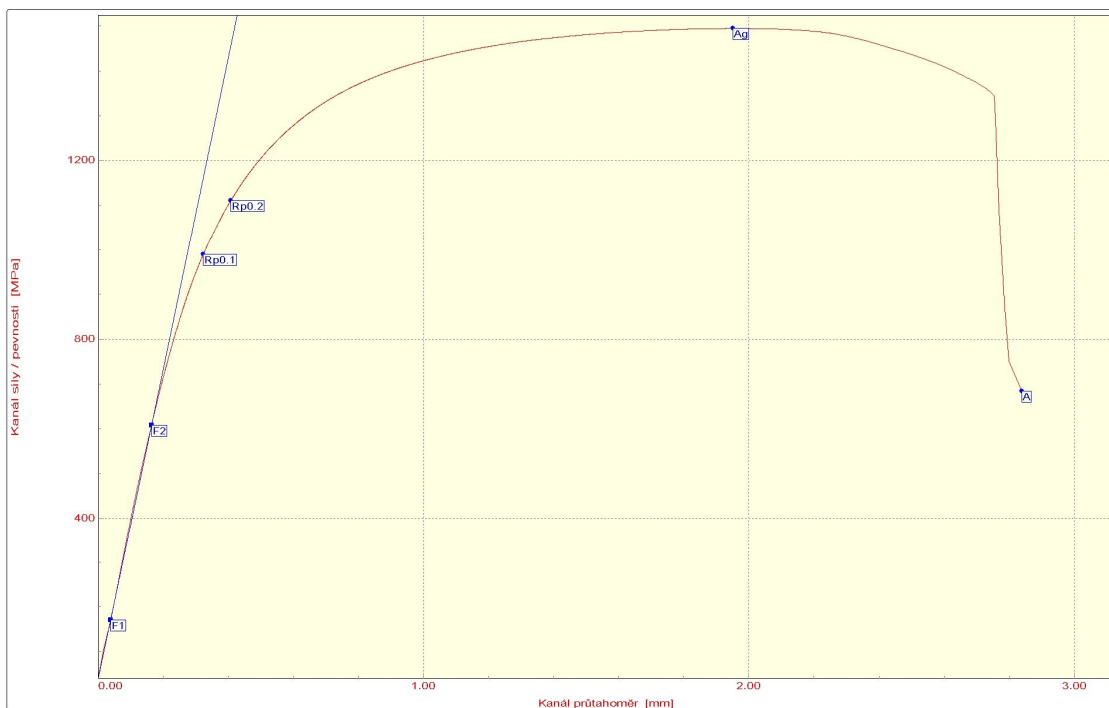
Směr odebrání vzorku: 0°

Datum zkoušky: 6.4.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
1	989.53	1111.58	1494.99	5.30	3.07	169232.03
2	1013.77	1136.27	1512.30	5.09	3.00	174008.14
3	924.71	1090.14	1540.30	5.60	3.18	215814.59
4	999.38	1149.76	1578.76	5.76	3.24	191596.97
5	913.27	1053.44	1476.21	5.66	3.46	198645.98
6	940.65	1076.38	1508.18	5.24	3.24	212310.17

Statistická hodnota	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	963.55	1102.93	1518.46	5.44	3.20	193601.31
Směrodatná odchylka	42.52	36.60	36.31	0.27	0.16	19238.88
Minimální hodnota	913.27	1053.44	1476.21	5.09	3.00	169232.03
Maximální hodnota	1013.77	1149.76	1578.76	5.76	3.46	215814.59



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: BTR 165 - laser

Norma: ČSN EN 10002-1

Vypracoval: Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: 10 mm/min

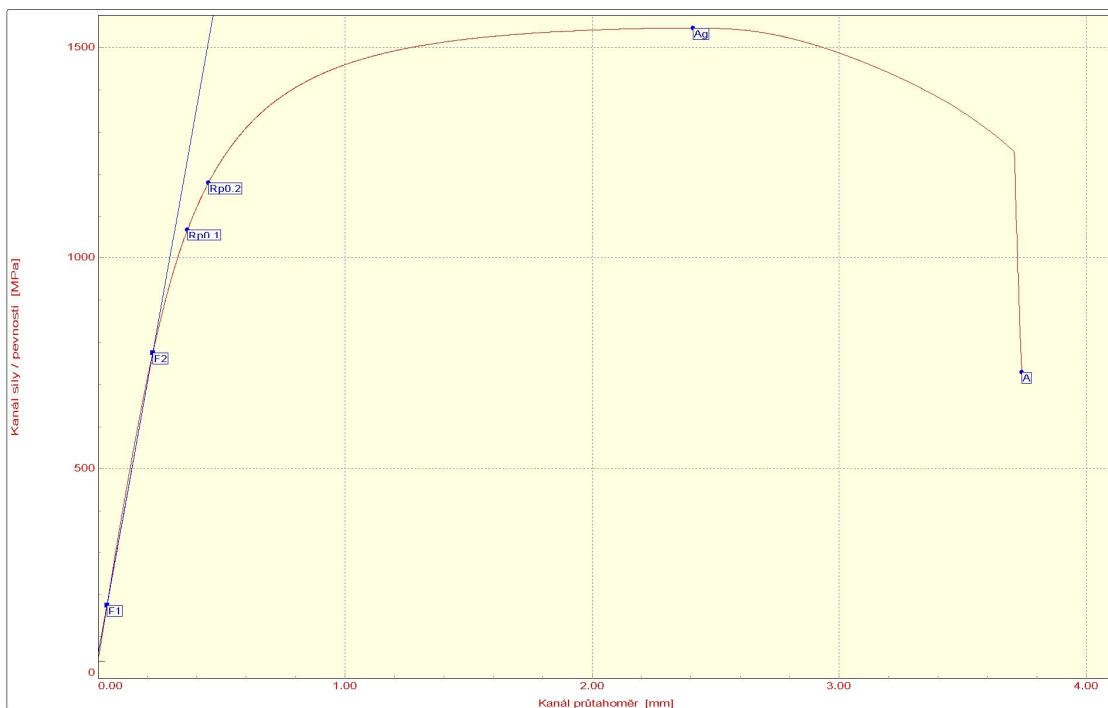
Směr odebrání vzorku: 0°

Datum zkoušky: 14.4.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
1	1068.23	1179.85	1546.36	7.06	3.90	119374.29
2	1073.58	1185.49	1553.38	6.70	3.22	130319.16
3	1088.83	1193.07	1530.55	7.24	2.67	116527.95
4	1061.85	1171.01	1527.18	7.16	3.63	122258.57
5	1081.45	1190.80	1540.61	6.75	3.19	118955.26
6	1070.21	1178.61	1541.59	7.10	3.97	121308.20

Statistická hodnota	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	1074.02	1183.10	1539.95	7.00	3.43	121457.23
Směrodatná odchylka	9.71	8.22	9.76	0.22	0.50	4776.92
Minimální hodnota	1061.85	1171.01	1527.18	6.70	2.67	116527.95
Maximální hodnota	1088.83	1193.07	1553.38	7.24	3.97	130319.16



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: BTR 165 - plazma

Norma: ČSN EN 10002-1

Vypracoval: Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: 10 mm/min

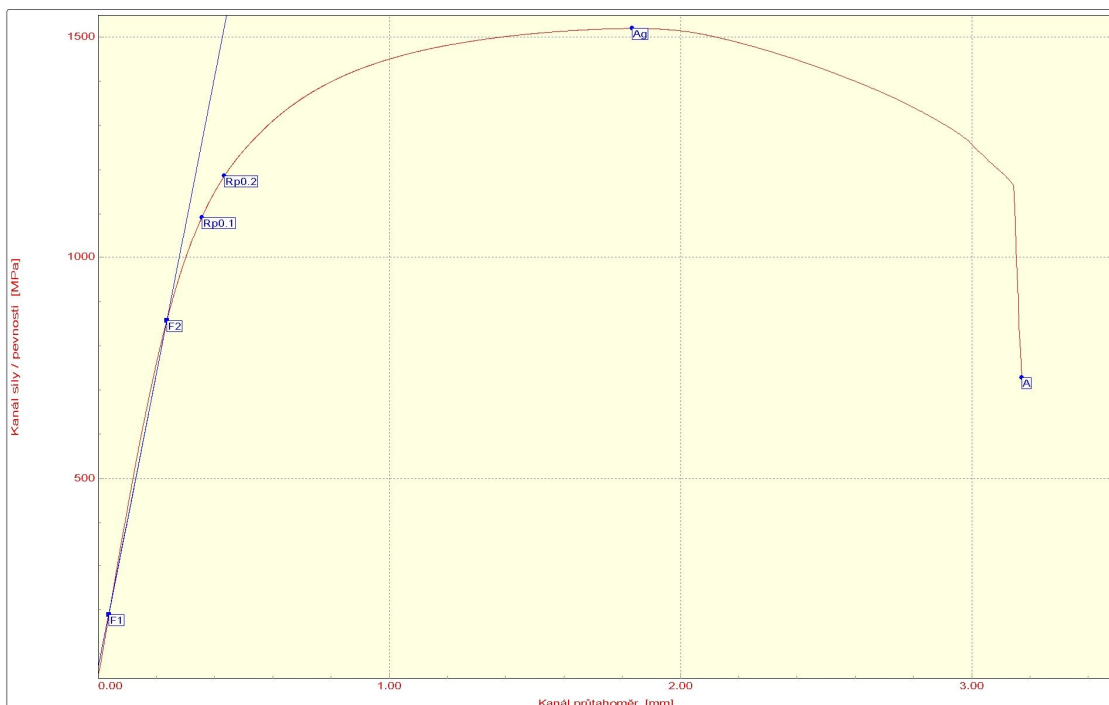
Směr odebrání vzorku: 0°

Datum zkoušky: 14.4.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
1	1113.86	1241.78	1552.27	5.93	2.72	206994.64
2	1075.10	1188.62	1505.43	6.25	2.89	91604.27
3	1072.60	1176.22	1547.12	5.85	3.17	129326.53
4	1097.68	1196.44	1546.62	6.32	3.12	119205.54
5	1148.40	1231.28	1505.22	6.18	2.33	123817.27
6	1092.14	1186.07	1519.35	5.95	2.80	122116.75

Statistická hodnota	Rp0.1 MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %	E MPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota	1099.96	1203.40	1529.34	6.08	2.84	132177.50
Směrodatná odchylka	28.19	26.67	21.88	0.19	0.31	38964.86
Minimální hodnota	1072.60	1176.22	1505.22	5.85	2.33	91604.27
Maximální hodnota	1148.40	1241.78	1552.27	6.32	3.17	206994.64





Protokoly ze zkoušky třibodovým ohybem

(Příloha č. 3)

ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

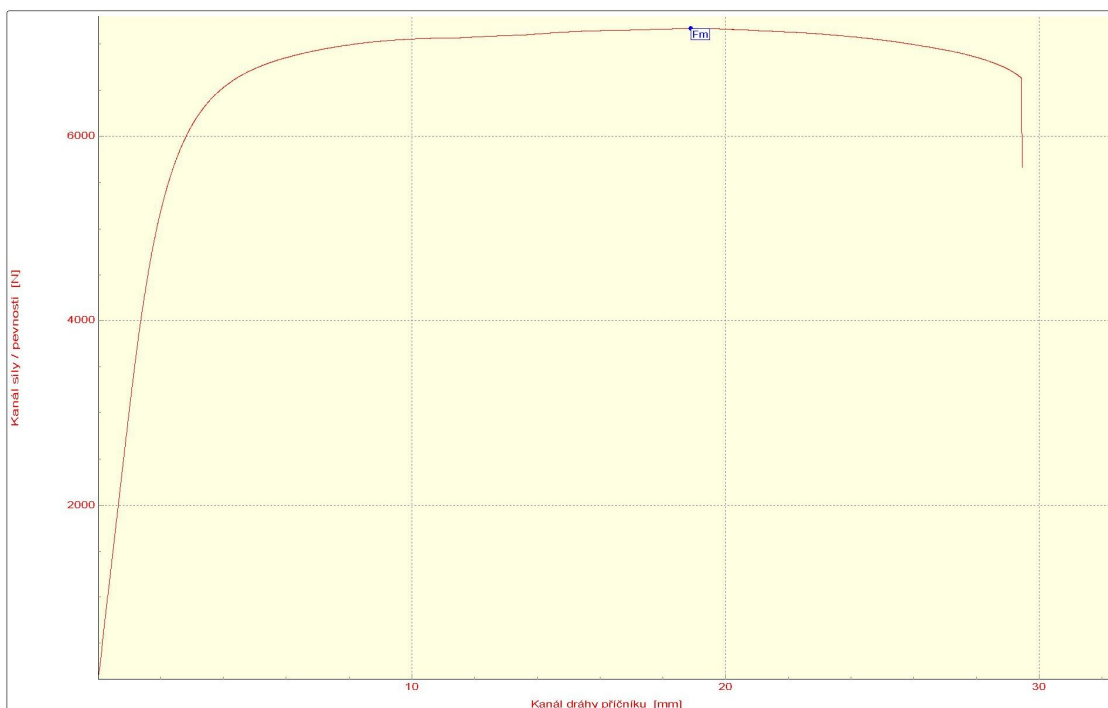
Testovaný materiál: : DOCOL 1200 M - broušeno
Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 7.5.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	F _m N
1	7338.30
2	7164.30
3	7137.30

Statistická hodnota	F _m N
Počet zkoušek	3
Průměrná hodnota	7213.30
Směrodatná odchylka	109.09
Minimální hodnota	7137.30
Maximální hodnota	7338.30



ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

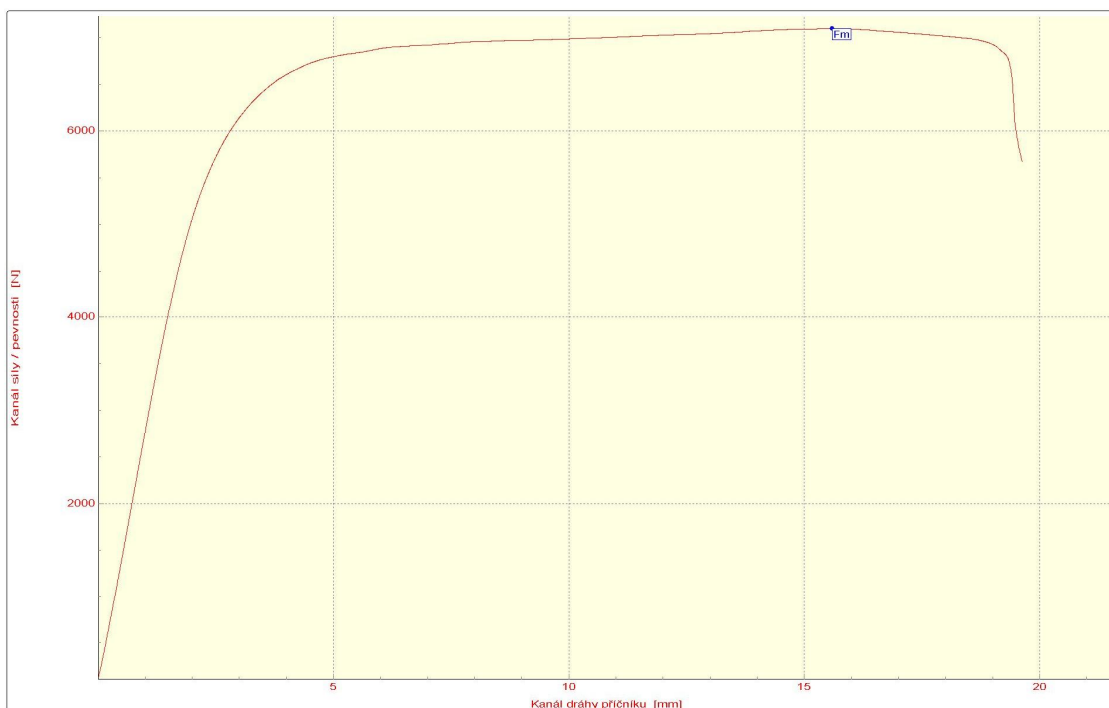
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DOCOL 1200 M - stříháno
Vypracoval: : Ing. Martin LuňáčekRychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 7.5.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	F _m N
1	7193.20
2	7096.60
3	6992.90

Statistická hodnota	F _m N
Počet zkoušek	3
Průměrná hodnota	7094.23
Směrodatná odchylka	100.17
Minimální hodnota	6992.90
Maximální hodnota	7193.20





ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

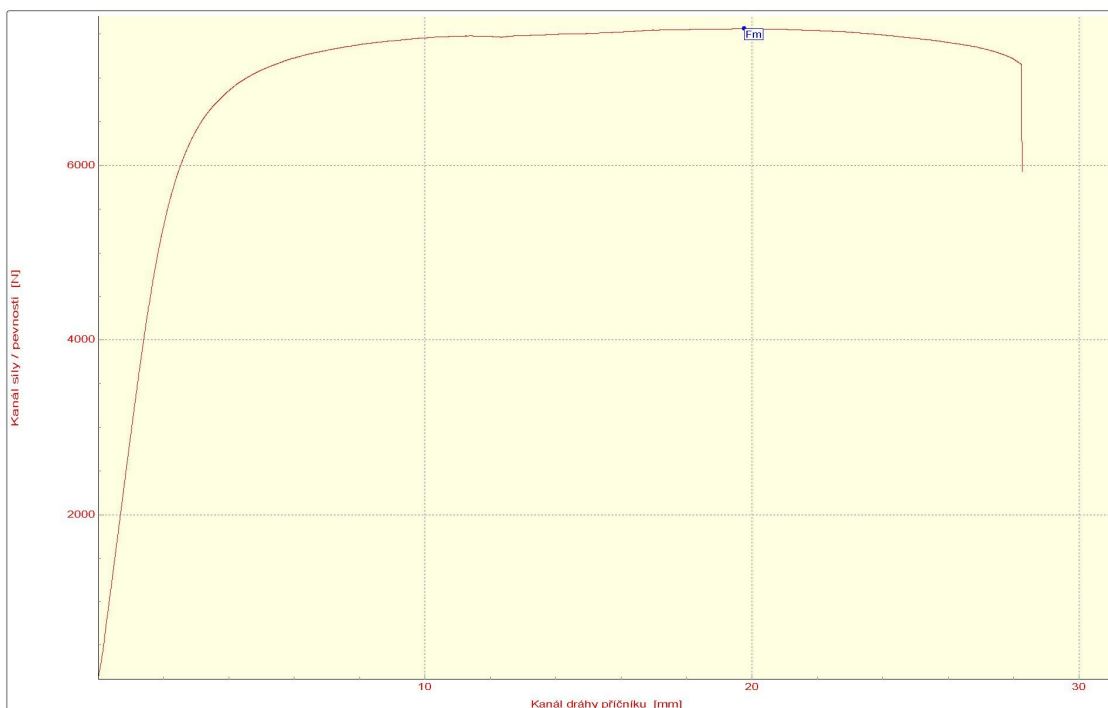
Testovaný materiál: : DOCOL 1200 M - laser
Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 7.5.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Fm N
1	7556.00
2	7562.10
3	7738.70

Statistická hodnota	Fm N
Počet zkoušek	3
Průměrná hodnota	7618.93
Směrodatná odchylka	103.77
Minimální hodnota	7556.00
Maximální hodnota	7738.70



ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

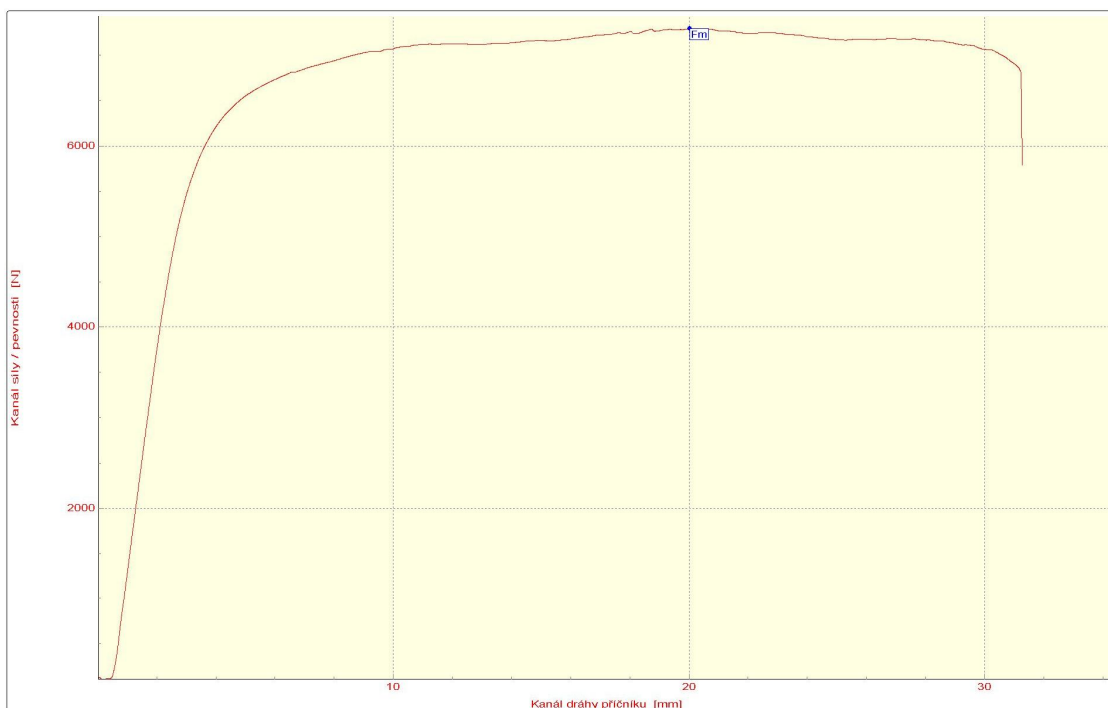
Testovaný materiál: : DOCOL 1200 M - plazma
Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 7.5.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	F _m N
1	7292.00
2	7050.70
3	7104.70

Statistická hodnota	F _m N
Počet zkoušek	3
Průměrná hodnota	7149.13
Směrodatná odchylka	126.64
Minimální hodnota	7050.70
Maximální hodnota	7292.00





ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

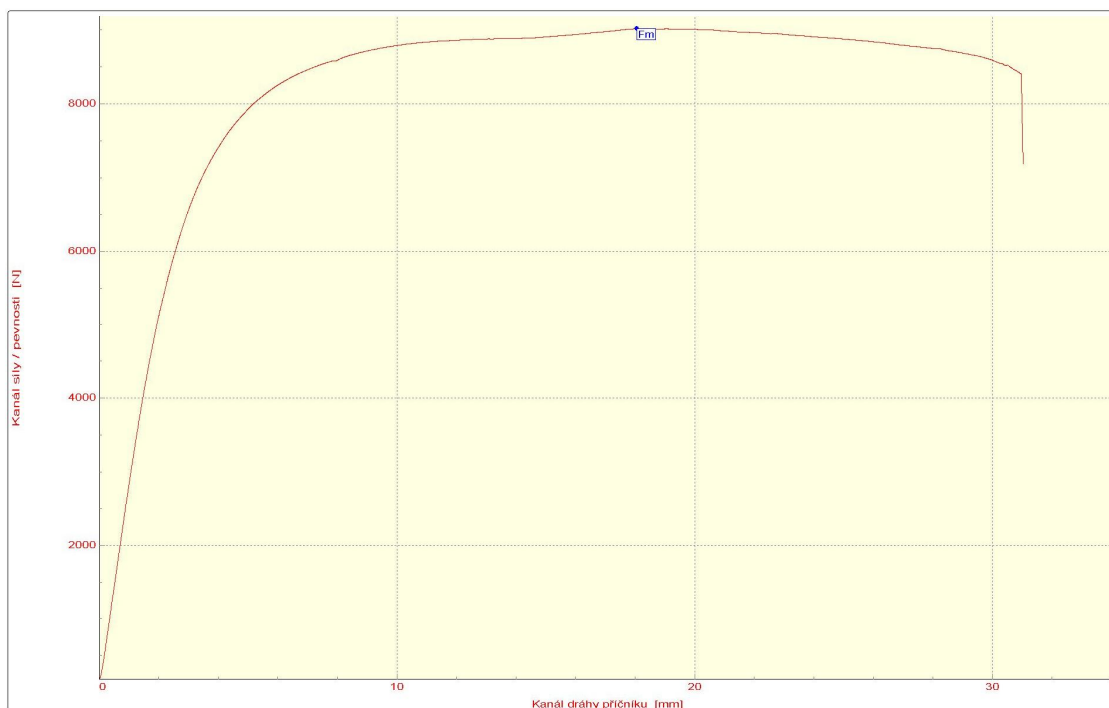
Testovaný materiál: : BTR 165 - broušeno
Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 7.5.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	F _m N
1	9018.20
2	8965.60
3	9424.00

Statistická hodnota	F _m N
Počet zkoušek	3
Průměrná hodnota	9135.93
Směrodatná odchylka	250.86
Minimální hodnota	8965.60
Maximální hodnota	9424.00



ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

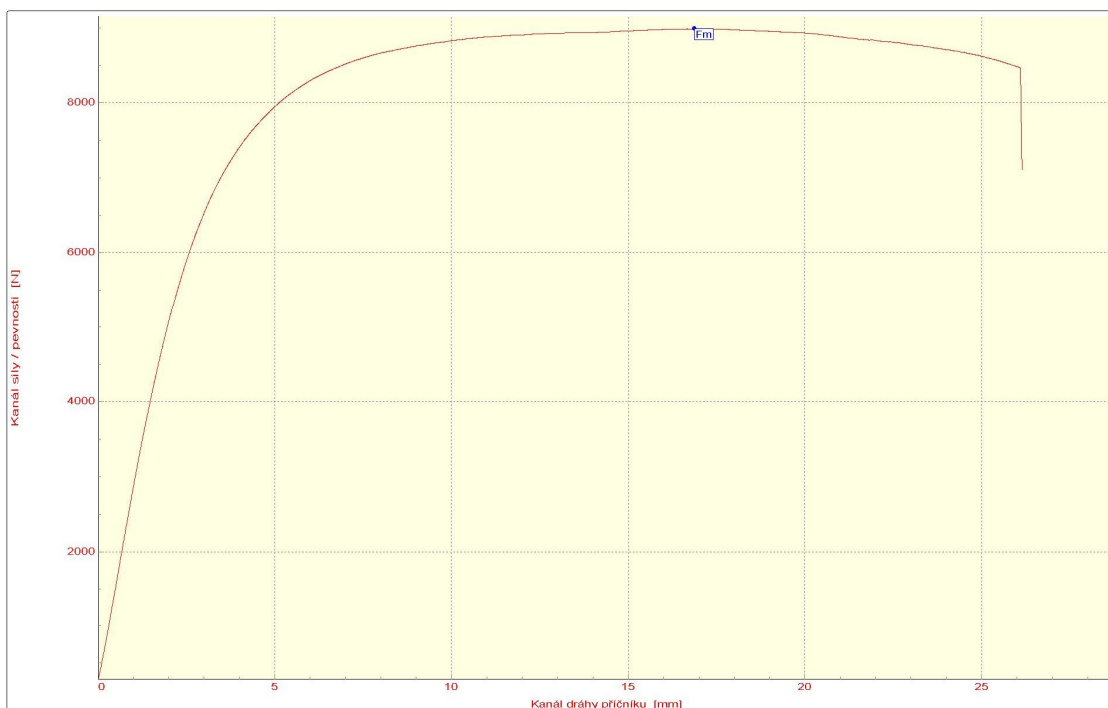
Testovaný materiál: : BTR 165 - stříháno před kalením
Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 7.5.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	F _m N
1	8987.00
2	9160.50
3	8796.80

Statistická hodnota	F _m N
Počet zkoušek	3
Průměrná hodnota	8981.43
Směrodatná odchylka	181.91
Minimální hodnota	8796.80
Maximální hodnota	9160.50



ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

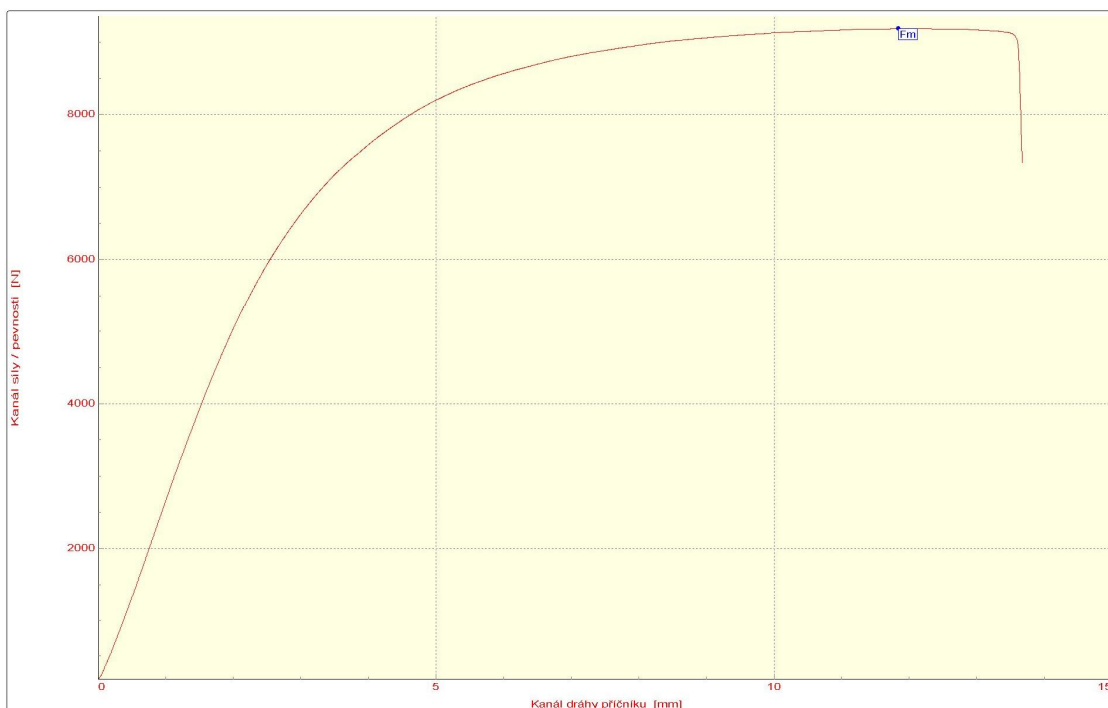
Testovaný materiál: : BTR 165 - stříháno po kalení
Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 7.5.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	F _m N
1	8891.10
2	9186.30
3	9673.90

Statistická hodnota	F _m N
Počet zkoušek	3
Průměrná hodnota	9250.43
Směrodatná odchylka	395.32
Minimální hodnota	8891.10
Maximální hodnota	9673.90



ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

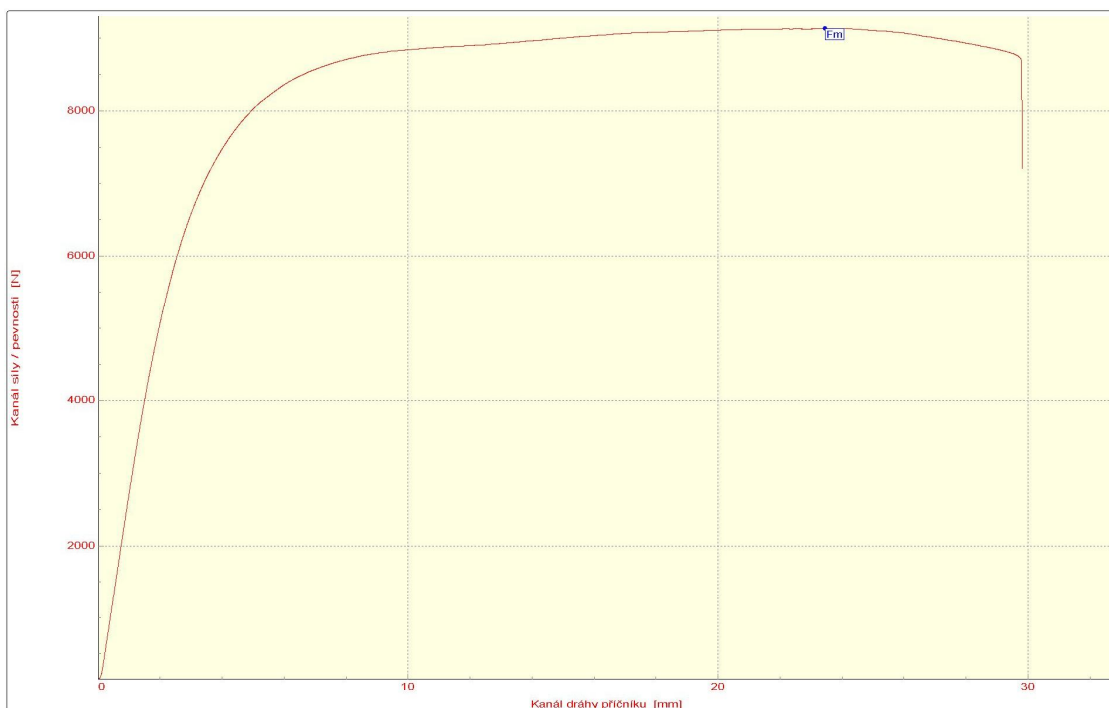
Testovaný materiál: : BTR 165 - laser
Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 7.5.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	F _m N
1	9431.80
2	9130.50
3	8983.20

Statistická hodnota	F _m N
Počet zkoušek	3
Průměrná hodnota	9181.83
Směrodatná odchylka	228.66
Minimální hodnota	8983.20
Maximální hodnota	9431.80





ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

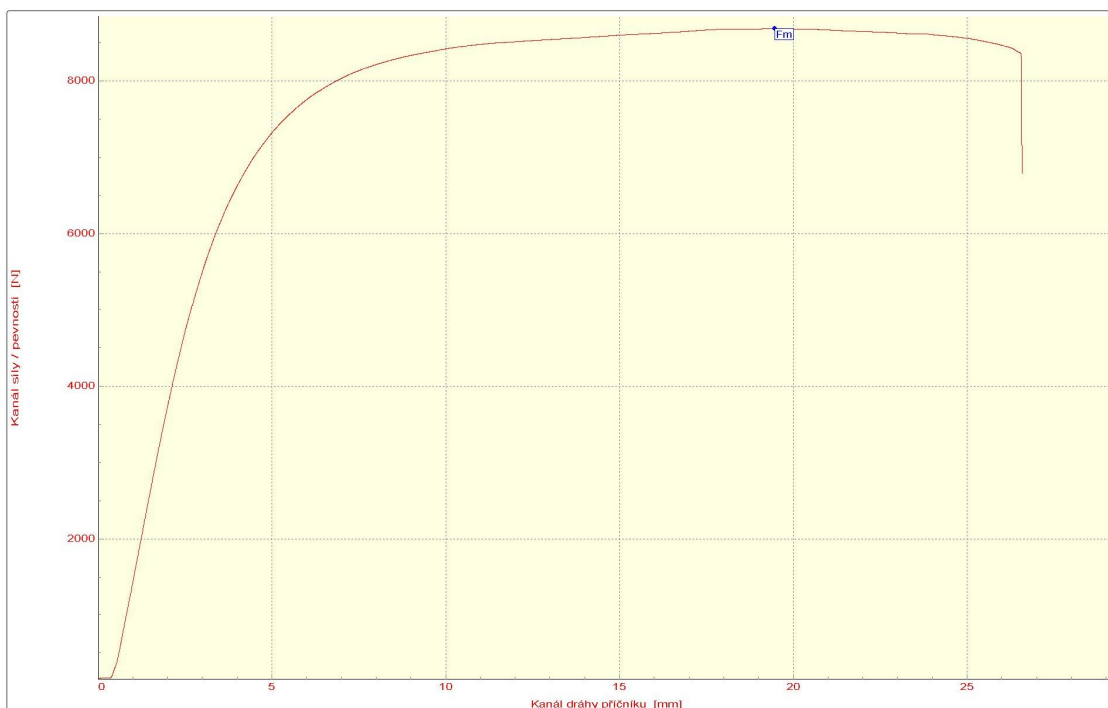
Testovaný materiál: : BTR 165 - plazma
Vypracoval: : Ing. Martin Luňáček

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 7.5.2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	F _m N
1	8681.70
2	8653.40
3	8840.90

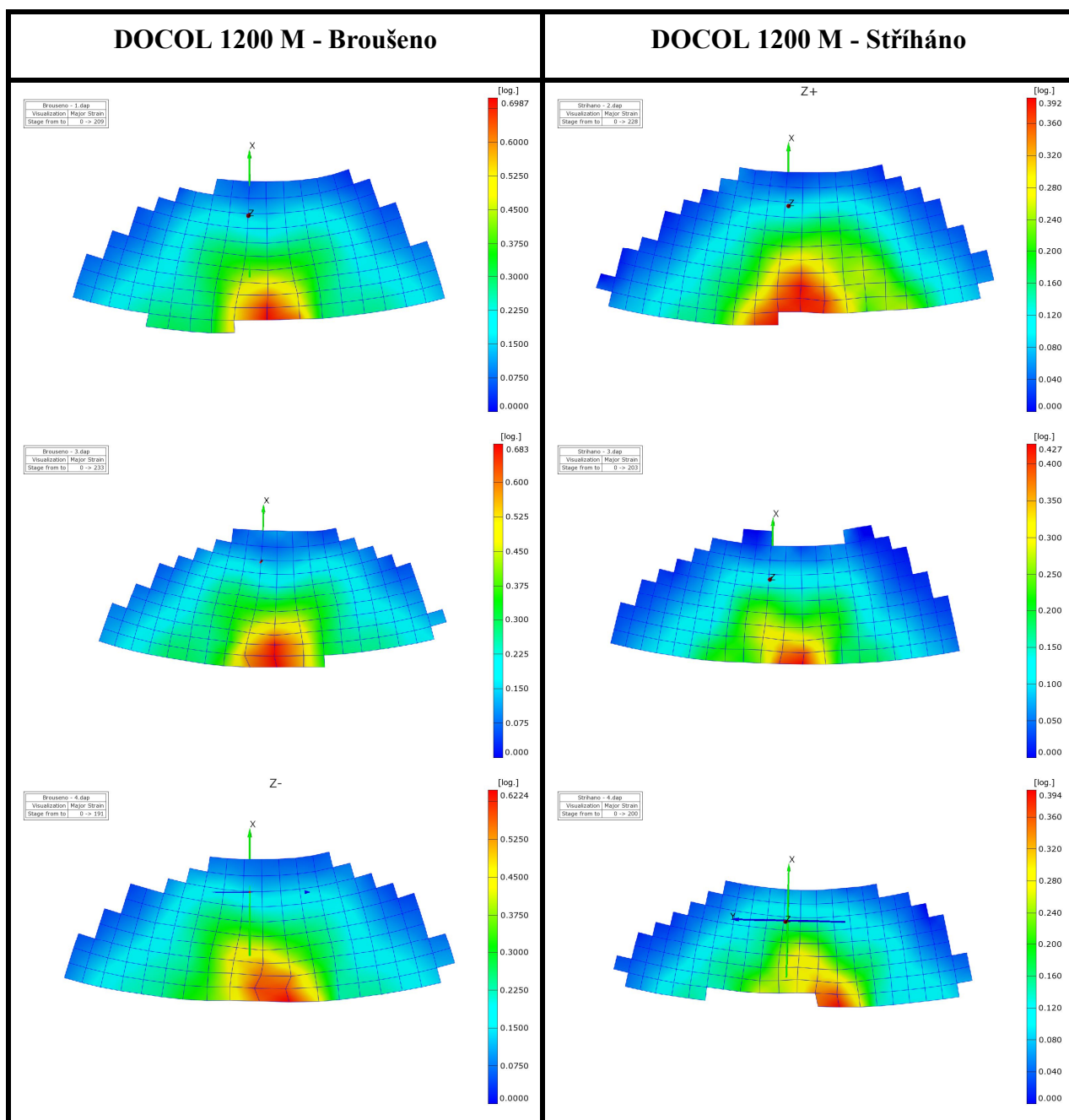
Statistická hodnota	F _m N
Počet zkoušek	3
Průměrná hodnota	8725.33
Směrodatná odchylka	101.08
Minimální hodnota	8653.40
Maximální hodnota	8840.90

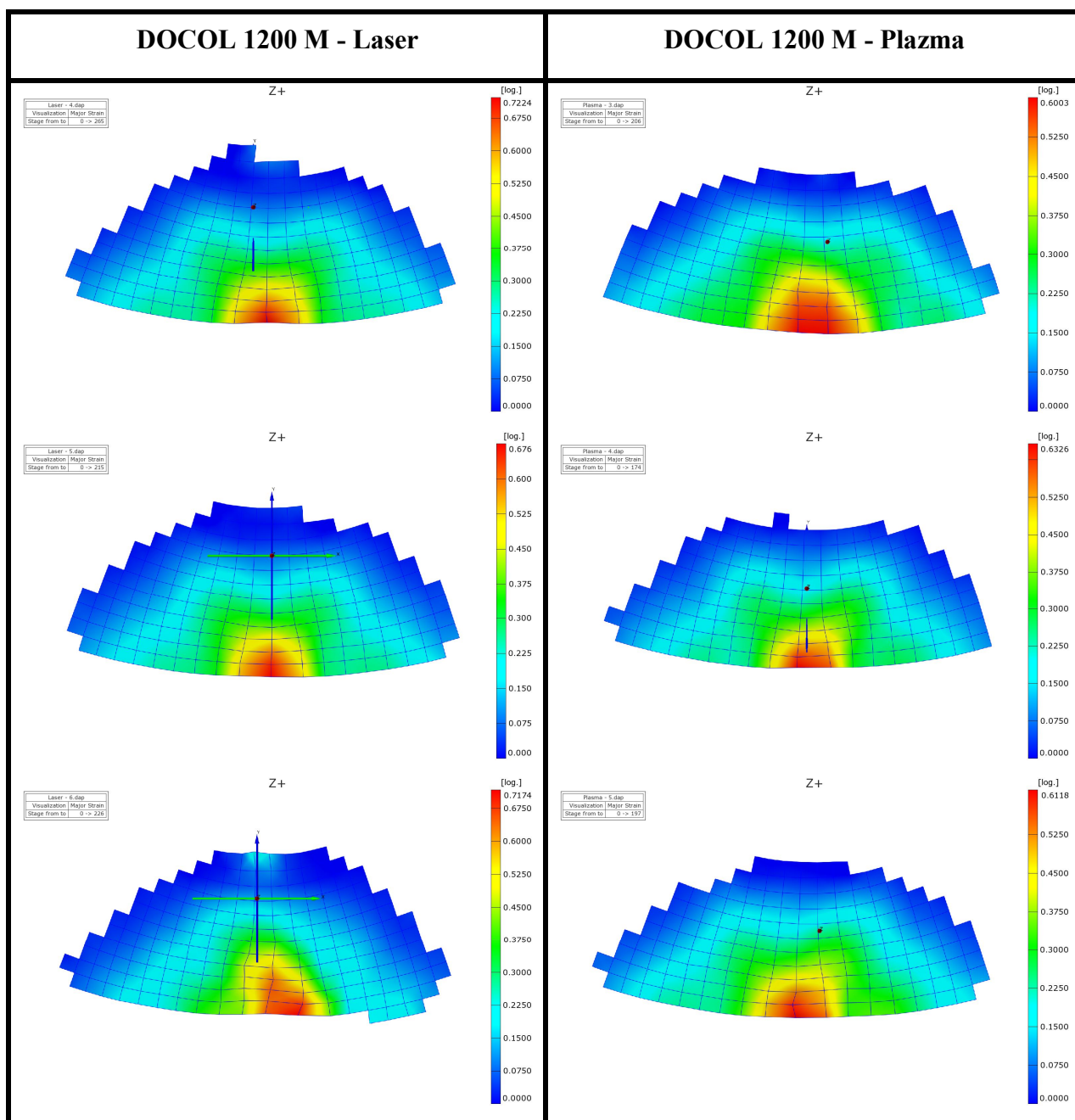


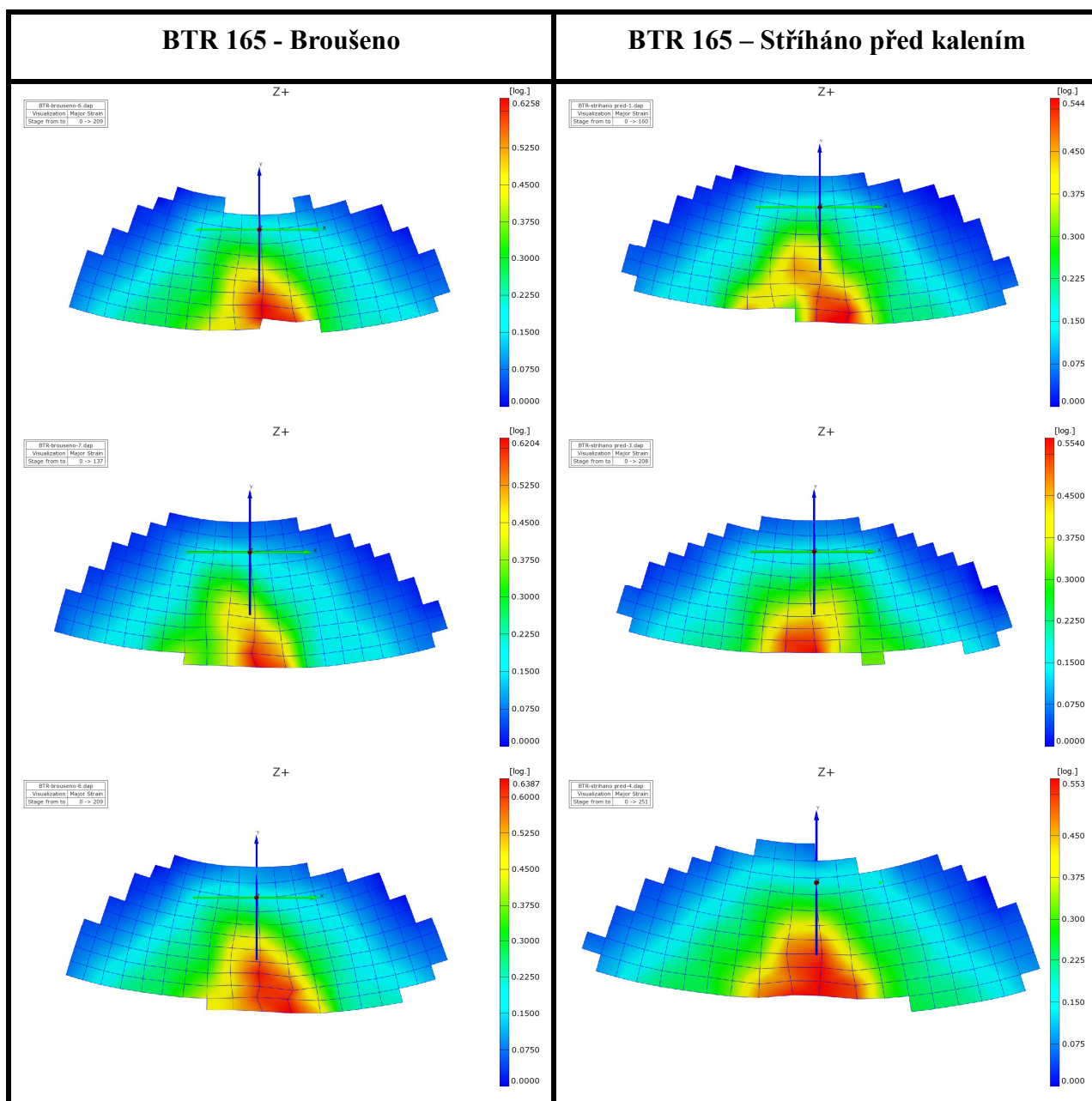


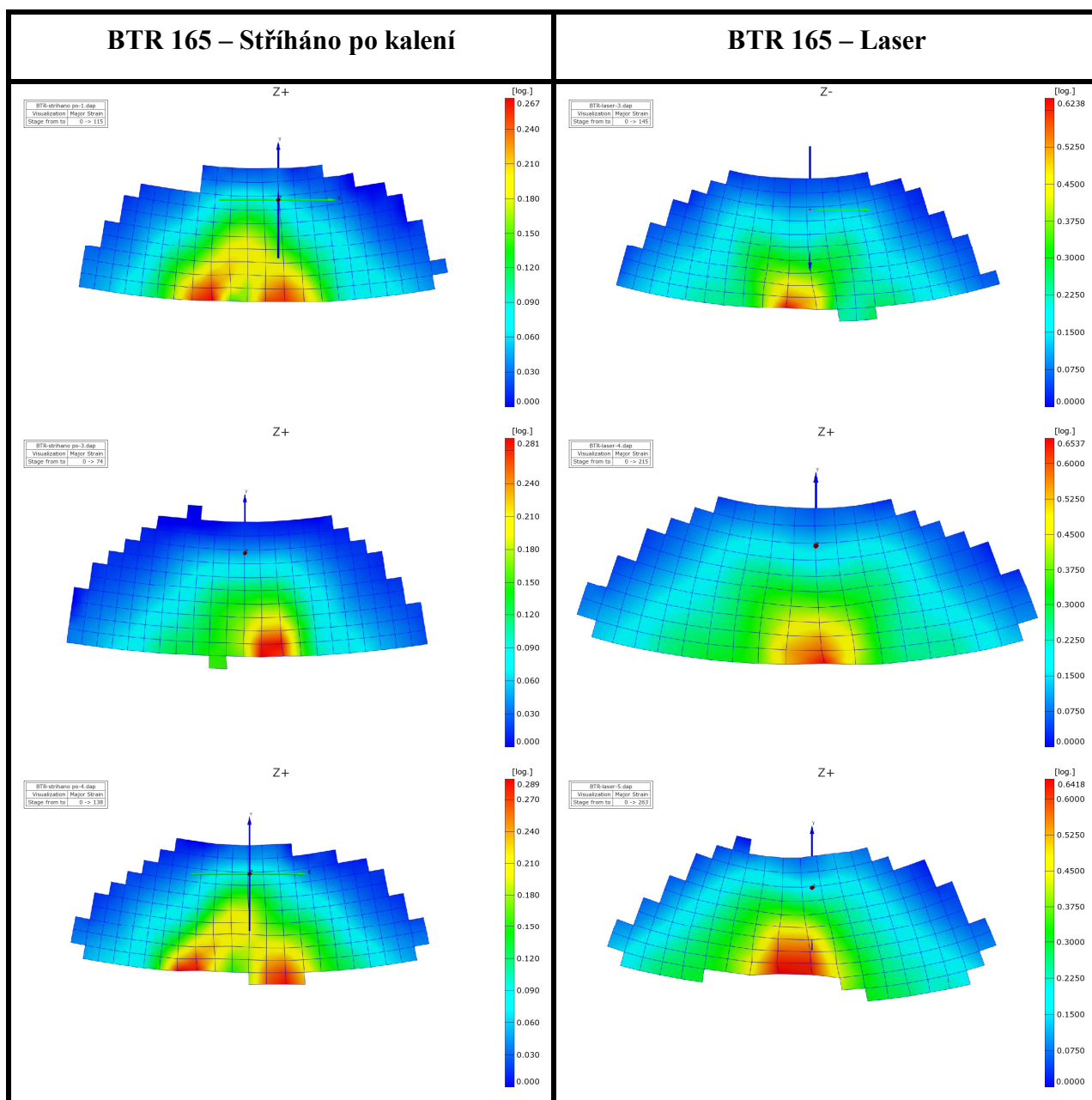
Grafické výsledky zkoušky tříbodovým ohybem

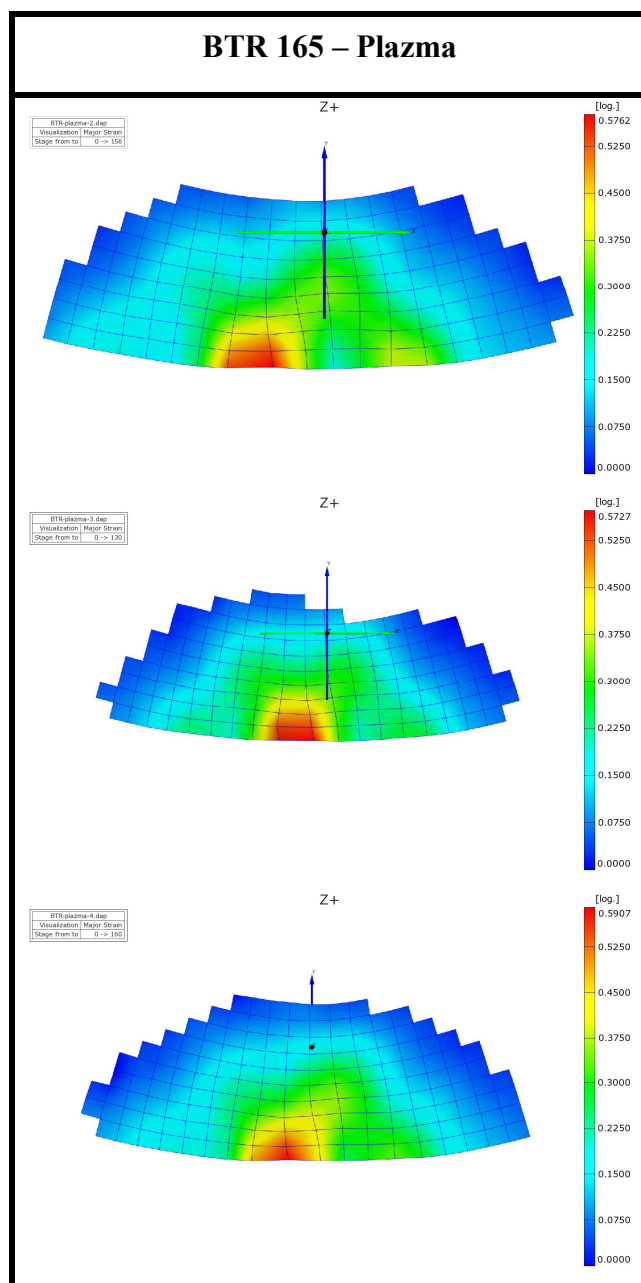
(Příloha č. 4)













Výkresová dokumentace

(Příloha č. 5)

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé doktorské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací se svým školitelem disertační práce.

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for the internal purposes of TUL.

If I use my dissertation or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation to the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the dissertation.

Datum / Date: 25.9.2009

Podpis/Signature: